Edris_Tn90
www.engineercenter.ir
سایت جامع مهندسی برق

فصل ۱ .... ۴
فصل ۲ .... ۲۲
فصل ۳ .... ۳۸
فصل ۴ .... ۸۸
فصل ۵ .... ۱۲۲
فصل ۶ .... ۱۵۴
فصل ۷ .... ۲۶۳

فصل ۱
مقدمه‌ای بر فیزیک الکترونیک

www.PnuEB.com

۱ـ مقاومت یک سیم مسی به قطر ۱/۰۳mm برابر $۲/۱۴ \times ۱۰^{-۴} \frac{\Omega}{cm}$ است. در صورتی که بدانیم چگالی الکترون‌های آزاد در مس $۸/۴ \times ۱۰^{۲۸} m^{-۳}$ است و با فرض اینکه چگالی جریان برابر $۲ \times ۱۰^{۶} \frac{A}{m^{۲}}$ باشد، مطلوبست محاسبه:

الف) مقدار جریان   **ب) رسانایی ویژه سیم**

ج) سرعت حرکت الکترون‌های آزاد   **قابلیت تحرک الکترون‌های آزاد**

☑ **راه حل:**

الف) می‌دانیم که رابطه چگالی جریان (J) و جریان (I) الکتریکی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$J = \frac{I}{A} \quad , \quad A = \pi R^{۲} \quad , \quad ۲R = ۱/۰۳ \Rightarrow R = \frac{۱/۰۳}{۲} \ m.m$$

$$\Rightarrow I = JA = ۲ \times ۱۰^{۶} \times \pi \times \left(\frac{۱/۰۳ \times ۱۰^{-۳}}{۲}\right)^{۲} = ۱/۶۶ \ (A)$$

ب) با توجه به داده مسئله مقاومت این رشته سیم به طول یک سانتیمتر $۲/۱۴ \times ۱۰^{-۴}$ اهم خواهد بود و از طرفی برای مقاومت داریم:

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ یا } \frac{L}{\sigma A} \Rightarrow \sigma = \frac{L}{AR} = \frac{۱(cm)}{۲/۱۴ \times ۱۰^{-۴} \times \pi \times \left(\frac{۱/۰۳ \times ۱۰^{-۱}}{۲}\right)^{۲}} = ۰/۵۶ \times ۱۰^{۶} \ (\Omega\text{-}cm)^{-۱}$$

ج) طبق رابطه (۱ ـ ۲ کتاب) داریم:

$$J=(nq).v \Rightarrow v=\frac{J}{nq}$$

$$\Rightarrow v=\frac{۲\times ۱۰^{۶}}{۸/۴\times ۱۰^{۲۸}\times ۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}} = ۱/۴۸۸\times ۱۰^{-۴}\ (\frac{m}{s})$$

د) طبق رابطه (۱ ـ ۳) خواهیم داشت:

$$\sigma = nq\mu_e$$

$$n=۸/۴\times ۱۰^{۲۸}(m^{-۳}) = ۸/۴\times ۱۰^{۲۲}\ (cm^{-۳})$$

$$\rightarrow \mu_e=\frac{\sigma}{nq}=\frac{۰/۵۶\times ۱۰^{۶}}{۸/۴\times ۱۰^{۲۲}\times ۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}} = ۴۱/۶۶\ (\frac{cm^{۲}}{v\text{-}sec})$$

۲ ـ ثابت کنید که تعداد الکترون‌های آزاد در یک متر مکعب یک فلز برابر است با:

$$n=\frac{dv}{AM}=\frac{A_{۰}\times ۱۰^{۳}dv}{A}$$

که در آن d جرم حجمی ($\frac{kg}{m^{۳}}$)، v ظرفیت (تعداد الکترون‌های آزاد در هر اتم)، A وزن اتمی (g)، M وزن یک اتم با وزن اتمی واحد (kg) و $A_{۰}$ عدد آووگادرو است.

☑ **راه حل:**

n = تعداد مول × ظرفیت

اگر $A_{۰}$ عدد آووگادرو باشد خواهیم داشت:

n = تعداد مول × $A_{۰}$ × ظرفیت

تعداد مول = جرم / وزن اتمی = حجم × چگالی / وزن اتمی

چون در صورت مسئله فرض شده است که حجم یک متر مکعب را در نظر بگیرید به جای حجم در رابطه فوق یک قرار می‌دهیم. بنابراین خواهیم داشت:

تعداد مول = $\frac{d\times ۱}{A}$

$$\Rightarrow n=v.A_{۰}.\frac{d\times ۱}{A\times ۱۰^{-۳}(gr)}=\frac{A_{۰}\times vd\times ۱۰۰}{A(gr)}$$

همچنین می‌توان نوشت:

n = ظرفیت × (جرم کل / جرم یک اتم فلز) = (حجم × d / جرم یک اتم فلز) × v

M.A = (وزن اتمی) A × (وزن اتمی با وزن واحد) M = جرم یک اتم فلز

$$\Rightarrow n=\frac{d\times ۱\times v}{MA}=\frac{dv}{MA}$$

۳ ـ مقاومت یک میله از جنس سیلیکن به طول ۵ cm و سطح مقطع ۸ mm² را به دست آورید.

☑ **راه حل:**

برای سیلیکن $\mu_n=۱۳۰۰$ و $\mu_p=۵۰۰$ و $n_i=۱/۵\times ۱۰^{۱۰}$ می‌باشد. بنابراین σ قابل محاسبه می‌باشد:

$$\sigma = q\times n_i(\mu_n+\mu_p)$$

$$\sigma=۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱/۵\times ۱۰^{۱۰}(۱۳۰۰+۵۰۰)=۴/۳۲\times ۱۰^{-۶}=\frac{۱}{\rho}$$

$$\Rightarrow \rho=\frac{۱}{۴/۳۲\times ۱۰^{-۶}}=۲۳۱/۴۸\times ۱۰^{۳}\ (\Omega\text{-cm})$$

با توجه به رابطه مقاومت $R=\frac{\rho L}{A}$ خواهیم داشت:

$$R=\frac{۲۳۱/۴۸\times ۵\times ۱۰^{۳}}{۸\times ۱۰^{-۲}(cm^{۲})}=۱۴/۴۶\times ۱۰^{۶}\Omega$$ یا ۱۴/۴۶ MΩ

۴ ـ به یک قطعه نیمه هادی، هم ناخالصی نوع N و هم ناخالصی نوع P تزریق شده است. اگر چگالی ناخالصی‌ها به ترتیب برابر $N_D=۲\times ۱۰^{۱۲}\ cm^{-۳}$ و $N_A=۵\times ۱۰^{۱۱}\ cm^{-۳}$ باشند، چگالی حفره‌ها (P) و چگالی الکترون‌های آزاد (n) را محاسبه نمایید. برای نیمه هادی مورد نظر چگالی خالص $n_i=۳\times ۱۰^{۱۱}\ cm^{-۳}$ می‌باشند.

☑ **راه حل:**

با توجه به رابطه (۱ ـ ۹) داریم:

$$P+N_D=n+N_A$$

$$\Rightarrow P+۲\times ۱۰^{۱۲}=n+۵\times ۱۰^{۱۱} \qquad (۱)$$

$$np=n_i^{۲}\Rightarrow np=(۳\times ۱۰^{۱۱})^{۲}=۹\times ۱۰^{۲۲} \qquad (۲)$$

از حل معادله (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$p=n-۱/۵\times ۱۰^{۱۲}\Rightarrow n(n-۱/۵\times ۱۰^{۱۲})=۹\times ۱۰^{۲۲}$$

$$n^{۲}-۱/۵\times ۱۰^{۱۲}n-۹\times ۱۰^{۲۲}=۰\Rightarrow n=۱۵/۵۷\times ۱۰^{۱۱}\ cm^{-۳}$$

$$p=(۱۵/۵۷-۱۵)\times ۱۰^{۱۱}=۰/۵۷\times ۱۰^{۱۱}\ cm^{-۳}$$

۵ ـ چگالی حفره‌ها و الکترون‌های آزاد را در دمای ۳۰۰°K برای بلورهای زیر محاسبه کنید:

الف) ژرمانیوم نوع P با مقاومت ویژه ۰/۰۲Ω-cm

ب) سیلیکن نوع N با مقاومت ویژه ۲۰Ω-cm

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

الف) می‌دانیم که $n=\frac{n_i^۲}{p}$ اگر p را محاسبه کنیم مقدار n به دست خواهد آمد. داریم:

$$nq\mu_n + pq\mu_p = \sigma$$

چون در نیمه هادی نوع p، p از n خیلی بزرگتر است بنابراین:

$$pq\mu_p \cong \sigma \Rightarrow p=\frac{\sigma}{q\mu_p}=\frac{\frac{۱}{۰/۰۲}}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۸۰۰}=۱/۷۴\times ۱۰^{۱۷}\ (cm^{-۳})$$

$$n=\frac{n_i^۲}{p}=\frac{(۲/۵\times ۱۰^{۱۳})^۲}{۱/۷۴\times ۱۰^{۱۶}}=۳/۵۹\times ۱۰^{۹}\ (cm^{-۳})$$

ب) در نیمه هادی نوع N، n از p بزرگتر است بنابراین:

$$nq\mu_n \cong \sigma \Rightarrow n=\frac{\sigma}{q\mu_n}=\frac{\frac{۱}{۲۰}}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۳۰۰}=۲/۴\times ۱۰^{۱۴}\ (cm^{-۳})$$

$$p=\frac{n_i^۲}{n}=\frac{(۱/۵\times ۱۰^{۱۰})^۲}{۲/۴\times ۱۰^{۱۴}}=۹/۳۷\times ۱۰^{۵}\ (cm^{-۳})$$

۶ـ چگالی حفره‌ها و الکترون‌های آزاد را برای یک نمونه سیلیکن با $N_D = ۱/۸۷۴\times ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}$ و $N_A = ۳/۷۴۸\times ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}$ به دست آورید.

☑ **راه حل:**

در سیلیکن $n_i = ۱/۵\times ۱۰^{۱۰}$ می‌باشد.

در نیمه هادی نوع N: چگالی حفره‌ها $P_n \cong \frac{n_i^۲}{N_D}=\frac{(۱/۵\times ۱۰^{۱۰})^۲}{۱/۸۷۴\times ۱۰^{۱۳}}=۱/۲\times ۱۰^{۷}\ cm^{-۳}$

در نیمه هادی نوع P: چگالی الکترون‌های آزاد $n_p \cong \frac{n_i^۲}{N_A}=\frac{(۱/۵\times ۱۰^{۱۰})^۲}{۳/۷۴۸\times ۱۰^{۱۳}}=۶\times ۱۰^{۶}\ cm^{-۳}$

۷ـ مقاومت ویژه ($\rho=\delta^{-۱}$) سیلیکن خالص را در دمای ۳۰۰°K به دست آورید. در صورتی که با افزایش ناخالصی نوع N مقاومت ویژه تا حد ۹/۶ Ω-cm کاهش یابد، نسبت چگالی اتم‌های ناخالصی به اتم‌های سیلیکن را در واحد حجم محاسبه نمایید.

☑ **راه حل:**

در یک بلور سیلیکن خالص هم حفره‌ها و هم الکترون‌ها در هدایت الکتریکی دخالت دارند بنابراین:

$$\sigma=qn_i(\mu_n+\mu_p)=۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱/۵\times ۱۰^{۱۰}(۱۳۰۰+۵۰۰)=۴/۳۲\times ۱۰^{-۱۶}\ (\Omega\text{-}cm)^{-۱}$$

$$\rho=\frac{۱}{\sigma}=۲۳۱/۴\ (k\Omega\text{-}cm)^{-۱}$$

اگر ناخالصی نوع N اضافه شود خواهیم داشت:

$$\sigma=\frac{۱}{\rho}=\frac{۱}{۹/۶}=۰/۰۱۴\ (\Omega\text{-}cm)^{-۱}$$

از طرفی داریم:

$$P_n=\frac{n_i^۲}{N_D}\quad,\quad n_p\cong N_D\quad,\quad \sigma=q\mu_n n_p+q\mu_p p_n$$

$$\sigma=q(۱۳۰۰N_D+۵۰۰\frac{n_i^۲}{N_D})=۰/۱۰۴\Rightarrow N_D=۵\times ۱۰^{۱۴}$$

$$\frac{N_D}{n_i}=\frac{۵\times ۱۰^{۱۴}}{۱/۵\times ۱۰^{۱۰}}=۳/۳۴\times ۱۰^{۴}\simeq ۳۳۴۰۰$$

۸ـ در یک بلور حاوی ناخالصی‌های نوع N و P، چگالی حفره‌ها ۱۰۰ برابر چگالی الکترون‌های آزاد است. در صورتی که برای این بلور $n_i = ۱۰^{۱۱}\ cm^{-۳}$ باشد، چه مقدار ناخالصی نوع N در واحد حجم باید به آن اضافه نمود تا به بلور خالص تبدیل شود؟

☑ **راه حل:**

$$p=۱۰۰n\quad,\quad np=n_i^۲$$

با توجه به دو رابطه فوق داریم: $۱۰۰n^۲=(۱۰^{-۱۱})^۲\Rightarrow n=۱۰^{۱۰}\ (cm^{-۳})$

$P=۱۰^{۱۲}(cm^{-۳})$

برای اینکه بلور خالص شود باید اندازه p و n با هم برابر شوند بنابراین به مقدار $۱۰^{۱۲}$ ـ $۱۰^{۱۰}$ الکترون آزاد باید به بلور اضافه شود $N_D=۹۹\times ۱۰^{۱۰}\ (cm^{-۳})$

تقریباً تعداد الکترون‌های آزاد باید همان $۱۰^{۱۲}$ باشد.

۹ـ به یک بلور نوع P آنقدر ناخالصی نوع N اضافه کرده‌ایم که به بلور خالص تبدیل شده است. اکنون اگر بخواهیم چگالی الکترون‌های آزاد را به ۱۰۰ برابر چگالی حفره‌ها برسانیم، چه مقدار ناخالصی نوع N در واحد حجم باید به آن اضافه کنیم. ($n_i = ۱۰^{۱۲}\ cm^{-۳}$)

☑ **راه حل:**

مشابه مسئله قبل داریم: $n=۱۰۰p \qquad (۱)$

www.PnuEB.com

$$np = n_i^2 = 10^{24} \qquad (2)$$

$$(1),(2) \Rightarrow p = 10^{11}\ (cm^{-3}) \Rightarrow n = 100p = 10^{13}\ (cm^{-3})$$

در نتیجه مقدار الکترون‌های آزاد N_D باید برابر با n باشد یعنی: $N_D \simeq 10^{13}\ (cm^{-3})$

۱۰ ـ در یک قطعه بلور چگالی حفره‌ها ۵ برابر چگالی الکترون‌های آزاد است. اگر با تزریق ناخالصی مناسب به این بلور، چگالی الکترون‌های آزاد را تا ۳ برابر چگالی حفره‌ها افزایش دهیم، مقاومت ویژه بلور با چه نسبتی تغییر می‌کند؟ (فرض کنید ($\mu_n = 3\mu_p$))

☑ **راه حل:**

در حالت اول $P = 5n$ می‌باشد پس خواهیم داشت:

$$\sigma_1 = nq\mu_n + pq\mu_p = q(3\mu_p n + p\mu_p) = q\mu_p(3n + p) = 8q\mu_p n$$

در حالت دوم $n = 3p$:

$$\sigma_2 = q\mu_p\left(3n + \frac{n}{3}\right) = q\mu_p n \cdot \frac{10}{3}$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{q\mu_p n \times 8}{q\mu_p \cdot n \times \frac{10}{3}} = 2.4$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{10}{24} = \frac{5}{12} = 0.416$$

۱۱ ـ در یک نمونه ژرمانیوم چگالی ناخالصی نوع N برابر $10^{14}\ cm^{-3}$ و چگالی ناخالصی P برابر $7 \times 10^{13}\ cm^{-3}$ است. در دمای معمولی، مقاومت ویژه ژرمانیم خالص برابر $60\ \Omega\text{-}cm$ است. در صورتی که چگالی جریان هدایت کل برابر $52.3 \frac{mA}{cm^2}$ باشد، شدت میدان الکتریکی اعمال شده چقدر است؟

☑ **راه حل:**

برای ژرمانیوم خالص می‌توان نوشت:

$$\delta = q.n_i(\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \delta = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{60} = n_i \times 1.6 \times 10^{-19} \times (3800 + 1800)$$

$$\Rightarrow n_i = 1.85 \times 10^{13}$$

در نیمه هادی فوق $N_A = 7 \times 10^{13}$ و $N_D = 10^{14}$ می‌باشد. پس داریم:

$$n.p = n_i^2 \quad , \quad n + N_A = P + N_D$$

$$\begin{cases} n.p = (1.85 \times 10^{13})^2 \\ n + 7 \times 10^{13} = p + 10^{14} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n = 3.88 \times 10^{13} \\ p = 0.88 \times 10^{13} \end{cases}$$

حال برای ژرمانیوم ناخالص با توجه به مقادیر به دست آمده داریم:

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p = q(n\mu_n + p\mu_p) = 1.6 \times 10^{-19}(3.88 \times 10^{13} \times 3800$$
$$+ 0.88 \times 10^{13} \times 1800) \Rightarrow \sigma = 261.5 \times 10^{-4}$$

$$J = \sigma E \Rightarrow E = \frac{J}{\sigma} = \frac{52.3 \times 10^{4}}{261.5} = 2\left(\frac{v}{cm}\right)$$

۱۲ ـ یک قطعه بلور نوع P با $N_A = 6 \times 10^{14}\ cm^{-3}$ در اختیار داریم. به این بلور به طور یکنواخت مقداری فسفر اضافه می‌کنیم. چگالی اتم‌های فسفر را برای هر یک از حالت‌های زیر تعیین کنید:

الف) چگالی الکترون‌های آزاد در بلور حاصل 10^6 برابر چگالی حفره‌ها شود ($n_i = 2.5 \times 10^{11} cm^{-3}$)

ب) مقاومت ویژه بلور حاصل k برابر بلور اولیه شود. (فرض کنید $\frac{\mu_n}{\mu_p} = b$، جواب را به صورت پارامتری بیان کنید و در صورت امکان در مورد مقادیر مناسب k بحث کنید.)

☑ **راه حل:**

الف) فرض مسئله $n = 10^6 p$

از طرفی داریم: $n.p = n_i^2 \rightarrow (10^6 p) \times p = n_i^2 \rightarrow 10^3 p = n_i \rightarrow p = \frac{n_i}{10^3} \qquad (I)$

$$n = 10^6 p = 10^6 \times \frac{n_i}{10^3} = 10^3 n_i \qquad (II)$$

رابطه مقابل را داریم $n + N_A = p + N_D \qquad (III)$

روابط (I) و (II) را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$10^3 n_i + N_A = \frac{n_i}{10^3} + N_D$$

داریم: $n_i = 2.5 \times 10^{11} cm^{-3} \qquad N_A = 6 \times 10^{14} cm^{-3} \qquad N_D = ?$

$$\rightarrow 10^3 \times 2.5 \times 10^{11} + 6 \times 10^{14} = \frac{2.5 \times 10^{11}}{10^3} + N_D \rightarrow 8.5 \times 10^{14} = 2.5 \times 10^{8} + N_D$$

$$\rightarrow N_D = 8.5 \times 10^{14} - 2.5 \times 10^{8} \simeq 8.5 \times 10^{14}\ cm^{-3}$$

www.*PnuEB*.com
www.*PnuEB*.com

ب) قبل از اضافه کردن فسفر مقاومت ویژه بلور به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho_1=\frac{1}{\delta_1}=\frac{1}{n_1 q\mu_n+p_1 q\mu_p} \qquad (I')$$

$n_1+N_{A_1}=P_1+N_{D_1}$:از طرفی

قبل از اضافه کردن فسفر $N_{D_1}=0$ می‌باشد و همچنین $n_1 \ll N_{A_1}$ می‌باشد پس داریم:

$$P_1=N_{A_1}=6\times 10^{14}$$

$n_1 p_1=n_i^2 \rightarrow n_1=\frac{(2/5\times 10^{11})^2}{(6\times 10^{14})}=1/04\times 10^8$:از طرفی

$$(I')\Rightarrow \rho_1=\frac{1}{\delta_1}=\frac{1}{q(1/04\times 10^8\mu_n+6\times 10^{14}\mu_p)}\simeq\frac{1}{q\times 6\mu_p\times 10^{14}}$$

در حالت دوم با اضافه کردن فسفر مقاومت ویژه به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho_2=\frac{1}{\delta_2}=\frac{1}{q(n_2\mu_n+p_2\mu_p)}=k\rho_1\rightarrow\frac{1}{q(n_2\mu_n+p_2\mu_p)}=k\times\frac{1}{6q\mu_p\times 10^{14}} \qquad (II')$$

فرض مسئله $\mu_n=b\mu_p$

$n_2 p_2=n_i^2 \rightarrow p_2=\frac{n_i^2}{n_2}$:از طرفی

$$(II')\Rightarrow\frac{1}{n_2\mu_n+\frac{n_i^2}{n_2}\mu_p}=k\times\frac{1}{6\mu_p\times 10^{4}}\rightarrow\frac{n_2}{n_2^2\times b+(2/5\times 10^{11})^2}=k\times\frac{1}{6\times 10^{14}}=a$$

$$\rightarrow ab\,n_2^2-n_2+6/25\times 10^{22}a=0\rightarrow n_2=\frac{1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}{2ab}$$

$$p_2=\frac{n_i^2}{n_2}=\frac{6/25\times 10^{22}}{\frac{1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}{2ab}}=\frac{6/25\times 10^{22}\times 2ab}{1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}$$

$n_2+N_{A_2}=P_2+N_{D_2}$:داریم

$$\Rightarrow\frac{1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}{2ab}+N_{A_2}=\frac{6/25\times 10^{22}\times 2ab}{1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}+N_{D_2}$$

$$\rightarrow N_{D_2}=\frac{1+1-25\times 10^{22}a^2b\pm 2\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}-(6/25\times 10^{22}\times 2ab)\times 2ab}{2ab(1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b})}+N_{A_2}$$

$$N_{A_1}=N_{A_2}=6\times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_2}=\frac{2-25\times 10^{22}a^2b(1+b)\pm 2\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b}}{2ab(1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b})}+6\times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_2}=\frac{2(1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b})-2/5\times 10^{22}a^2b(1+b)}{2ab(1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b})}+6\times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_2}=\frac{1}{ab}-\frac{12/5\times 10^{22}a\times(1+b)}{(1\pm\sqrt{1-25\times 10^{22}a^2b})}+6\times 10^{14}$$

$a=\frac{k}{6\times 10^{14}}$:از طرفی

$$\Rightarrow N_{D_2}=\frac{6\times 10^{14}}{kb}-\frac{20/83\times 10^{7}k\times(1+b)}{1\pm\sqrt{1-0/694\times 10^{-6}k^2b}}+6\times 10^{14}$$

از آنجایی که N_{D_2} باید عدد مثبتی باشد پس باید داشته باشیم:

$$\frac{6\times 10^{14}}{kb}+6\times 10^{14}>\frac{20/83\times 10^{7}\times k(1+b)}{1\pm\sqrt{1-0/694\times 10^{-6}k^2b}}$$

$$\rightarrow(1\pm\sqrt{1-0/694\times 10^{-6}k^2b})(1+kb)>\frac{20/83\times 10^{7}\times k^2b(1+b)}{6\times 10^{14}}$$

$$\rightarrow(1\pm\sqrt{1-0/69\times 10^{-6}k^2b})(1+kb)>3/47\times 10^{-7}\times k^2b(1+b)$$

داخل رادیکال باید مثبت باشد: $1-0/694\times 10^{-6}k^2b>0\rightarrow k^2b<\frac{10^6}{0/694}=1/44\times 10^6$

۱۳ ـ به یک قطعه نیمه هادی از جنس ژرمانیم در دمای معمولی، اتم‌های ناخالصی پذیرنده اضافه شده است. اگر مقاومت کل که دارای طول یک سانتیمتر و سطح مقطع ۲۰ میلیمتر مربع است برابر ۴۰ اهم باشد.

الف) میزان چگالی ناخالصی (N_A) اضافه شده به قطعه را به دست آورید.

ب) اگر به همین قطعه علاوه بر ناخالصی پذیرنده بند (الف) ناخالصی بخشنده نیز با چگالی $N_D=3\times 10^{14}\ cm^{-3}$ اضافه شود، مقدار مقاومت جدید قطعه را به دست آورید.

www.PnuEB*.com

ب) می‌دانیم $V_T = ۲۶\ mv$ و $V_{\circ} = V_T\ L_n \frac{N_A . N_D}{(n_i)^{۲}}$ در نتیجه داریم:

$$V_{\circ} = ۲۶\times ۱۰^{-۳} \times L_n \frac{۱۰^{۱۴}\times ۱۰^{۱۶}}{(۱/۵\times ۱۰^{۱۰})^{۲}} = ۰/۳۸۷\ (V_{\circ}H)$$

ج) $W = x_p + x_n = \left[\frac{۲\varepsilon V_{\circ}}{q}\left(\frac{۱}{N_A}+\frac{۱}{N_D}\right)\right]^{\frac{۱}{۲}}$ و $\varepsilon_r = ۱۲$

$$= \left[\frac{۲\times ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}\times ۱۲\times ۰/۳۸۷}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}}\times\left(\frac{۱}{۱۰^{۱۴}}+\frac{۱}{۱۰^{۱۶}}\right)\right]^{\frac{۱}{۲}} =$$

$$= ۲/۲۷\,mm$$

$$x_p = \left[\frac{۲\varepsilon V_{\circ}}{qN_A(۱+\frac{N_A}{N_D})}\right]^{\frac{۱}{۲}} = \left[\frac{۲\times ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}\times ۱۲\times ۰/۳۸۷}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۰^{۱۴}(۱+\frac{۱/۱۴}{۱۰^{۱۶}})}\right]^{\frac{۱}{۲}} = ۲/۲۵\,mm$$

$$x_n = W - x_p = ۲/۲۷ - ۲/۲۵ = ۰/۰۲\,mm$$

۱۶ـ در یک پیوند P-N، $N_D = ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}$ و $N_A = ۱۰^{۱۷}\ cm^{-۳}$ است. این پیوند را در دمای معمولی به یک ولتاژ خارجی 5 ولتی به صورت بایاس معکوس وصل می‌کنیم

$(n_i = ۱/۵\times ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}\ ,\ \varepsilon = ۱/۱\times ۱۰^{-۱۲}\ \frac{F}{m})$

الف) پیشرفتگی ناحیه تهی را در هر قسمت به دست آورید.

ب) عرض ناحیه تهی (W) چقدر می‌شود.

☑ **راه حل:**

الف)

$$x_p = \left[\frac{۲\varepsilon V_j}{qN_A(۱+\frac{N_A}{N_D})}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

$$V_j = V_{\circ} + V_d = V_d + V_T\ L_n \frac{N_A N_D}{n_i^{۲}} = ۵ + ۲۶\times ۱۰^{-۳}\ L_n \frac{۱۰^{۱۷}\times ۱۰^{۱۳}}{(۱/۵\times ۱۰^{۱۳})^{۲}} = ۵ + ۰/۲۱۸ = ۵/۲۱۸$$

ε بر حسب $\frac{F}{m}$ داده شده آن را بر حسب $\frac{F}{cm}$ می‌نویسیم:

$$\varepsilon = ۱/۱\times ۱۰^{-۱۴}\ \frac{F}{cm}$$

$$x_P = \left[\frac{۲\times ۱/۱\times ۱۰^{-۱۴}\times ۵/۲۱۸}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۰^{۱۷}\left[۱+\frac{۱۰^{۱۷}}{۱۰^{۱۳}}\right]}\right]^{\frac{۱}{۲}} = \left[\frac{۱۱/۵\times ۱۰^{-۱۴}}{۱۶۰۰۰۱/۶\times ۱۰^{-۲}}\right]^{\frac{۱}{۲}} = ۲/۶۸\times ۱۰^{-۸}\,cm$$

$$x_N = \left[\frac{۲\times ۱/۱\times ۱۰^{-۱۴}\times ۵/۲۱۸}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۰^{۱۳}\left[۱+\frac{۱۰^{۱۳}}{۱۰^{۱۷}}\right]}\right]^{\frac{۱}{۲}} = \left[\frac{۱۱/۵\times ۱۰^{-۱۴}}{۱/۶۰۰۱۶\times ۱۰^{-۶}}\right]^{\frac{۱}{۲}} = ۲/۶۸\times ۱۰^{-۴}\,cm$$

ب)

$$W = x_N + x_P = ۲/۶۸\times ۱۰^{-۸} + ۲/۶۸\times ۱۰^{-۴} = ۲/۶۸\times ۱۰^{-۴}\,cm$$

۱۷ـ در یک پیوند P-N از جنس سیلیکن، $N_D = ۳\times ۱۰^{۱۶}\ cm^{-۳}$ است.

الف) N_A را طوری تعیین کنید که اختلاف پتانسیل تماس $V_{\circ}$ در دمای معمولی برابر ۰/۷ ولت شود $(n_i = ۲/۵\times ۱۰^{۱۰}\ cm^{۳})$

ب) عرض ناحیه تهی (W) و پیشرفتگی آن در هر قسمت را به دست آورید.

☑ **راه حل:**

الف) $N_D = ۳\times ۱۰^{۱۶}\ (cm^{-۳})\ ,\ N_A = ?$

$$V_{\circ} = V_T\ L_n \frac{N_A N_D}{n_i^{۲}} \Rightarrow ۰/۷ = ۲۶\times ۱۰^{-۳}\ L_n \frac{۳\times ۱۰^{۱۶}\times N_A}{(۲/۵\times ۱۰^{۱۰})^{۲}}$$

$$\Rightarrow e^{\frac{۰/۷}{۰/۰۲۶}} = \frac{۳\times ۱۰^{۱۶}\times N_A}{(۲/۵\times ۱۰^{۱۰})^{۲}} \Rightarrow N_A = ۱/۲۶\times ۱۰^{۱۶}\ (cm^{-۳})$$

ب) $\varepsilon_r \cong ۱۲$

$$W = \left[\frac{۲\varepsilon V_{\circ}}{q}\left(\frac{۱}{N_A}+\frac{۱}{N_D}\right)\right]^{\frac{۱}{۲}} = \left[\frac{۲\times ۱۲\times \varepsilon_{\circ}\times ۰/۷}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}}\left(\frac{۱۰^{-۱۶}}{۱/۰۲۶}+\frac{۱۰^{-۱۶}}{۳}\right)\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

$$W = ۰/۳۴۸\,\mu m$$

$$x_p = \left[\frac{۲\varepsilon + \varepsilon_{\circ} V_{\circ}}{qN_D(۱+\frac{N_D}{N_A})}\right]^{\frac{۱}{۲}} = \left[\frac{۲\times ۱۲\times ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}\times ۰/۷}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۳\times ۱۰^{۱۶}(۱+\frac{۳}{۱/۰۲})}\right]^{\frac{۱}{۲}} = ۰/۰۹\,\mu m$$

$$x_N = W - x_p = ۰/۳۴۸ - ۰/۰۹ = ۰/۲۵۸\,\mu m$$

www.PnuEB.com

۱۸ـ تغییرات چگالی حفره‌ها در یک نمونه هادی مطابق شکل م ـ ۱۸ است.

الف) در صورتی که هیچ‌گونه میدان الکتریکی خارجی اعمال نشود، عبارت چگالی جریان $J_p(x)$ را به دست آورده و آن را رسم نمایید.

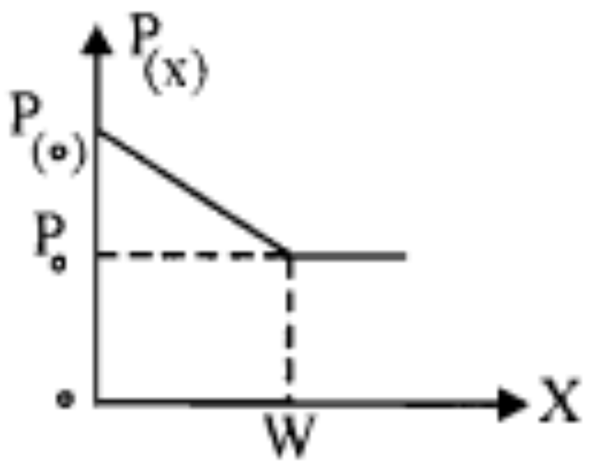
ب) شدت میدان الکتریکی داخلی $E(x)$ که باید وجود داشته باشد تا توزیع حفره نشان داده شده در شکل منجر به هیچ‌گونه جریان انتشاری حفره نشود را به دست آورید.

ج) با فرض $p(0)/p_0 = 10^3$، اختلاف پتانسیل بین نقاط $x=0$ و $x=W$ را محاسبه کنید.

☑ راه حل:

الف)

$$P(x)=\begin{cases} -\frac{(p(0)-p_0)}{W}x+p(0) & ; \quad 0<x<W \\ p_0 & ; \quad x>W\end{cases}$$

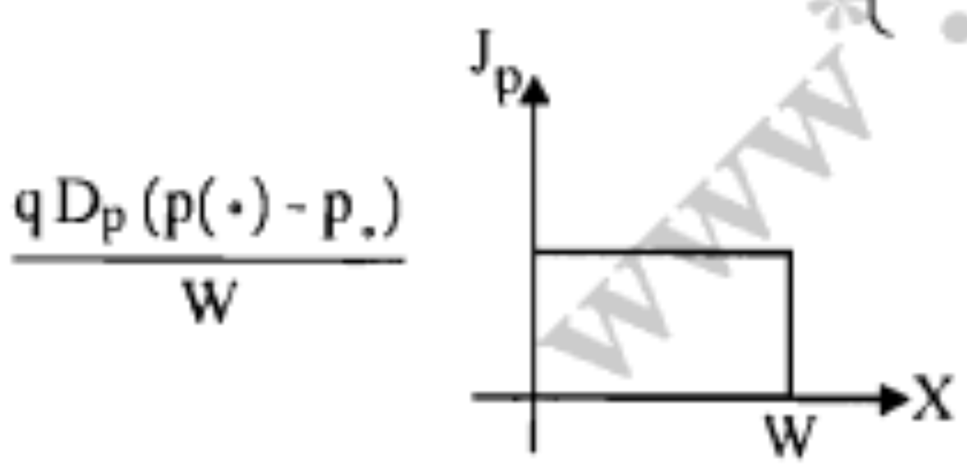


شکل م ـ ۱۸

$$J_p=-qD_p\frac{dp(x)}{dx}=-qD_p\frac{(p_0-p(0))}{W}$$

$$J_p=\begin{cases}0 & ; \quad x>W\\ \frac{q.D(p(0)-p_0)}{W} & ; \quad x<W\end{cases}$$

ب) با فرض $\frac{p(0)-p_0}{W}\triangleq M$



و با استفاده از رابطه $E(x)=\frac{V_T}{p(x)}.\frac{dp(x)}{dx}$ خواهیم داشت:

$$E(x)=\frac{V_T\cdot(-M)}{-Mx+p(0)}=\begin{cases}\frac{MV_T}{M_x-p(0)} & ; \quad x<W\\ 0 & ; \quad x>W\end{cases}$$

ج) $V_0=V_T L_N\frac{p(0)}{p_0}=26\times10^{-3}\times L_n\, 10^3=179/6 \text{ mv}$

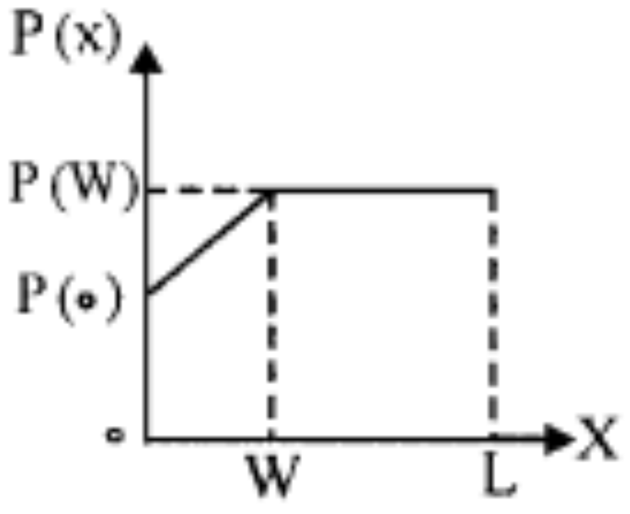
۱۹ـ در یک قطعه بلور نیمه هادی توزیع چگالی حفره‌ها مطابق شکل م ـ ۱۹ است.

الف) در صورتی که هیچ میدان خارجی اعمال نشود چگالی جریان انتشاری حفره‌ها را به دست آورده (به صورت پارامتری) و ترسیم نمایید.

ب) چه میدان الکتریکی داخلی به وجود می‌آید. عبارت آن را به دست آورده و ترسیم نمایید.

ج) اگر $p(W)/p(0)=10^{14}$ باشد، اختلاف پتانسیل بین نقاط $x=0$ و $x=l$ چقدر است؟

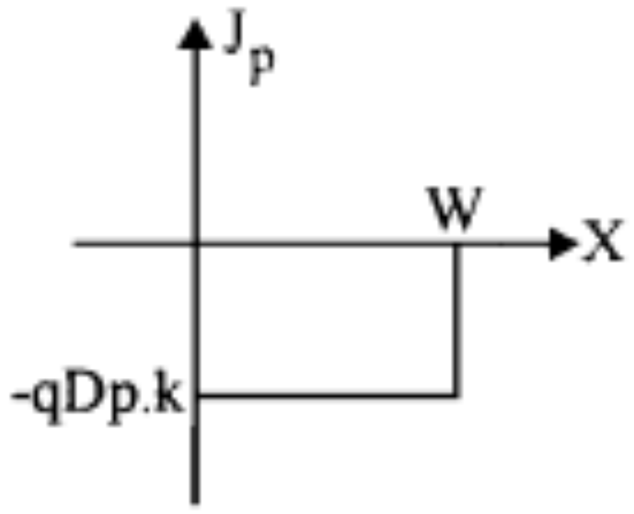
☑ راه حل:



شکل م ـ ۱۹

الف)

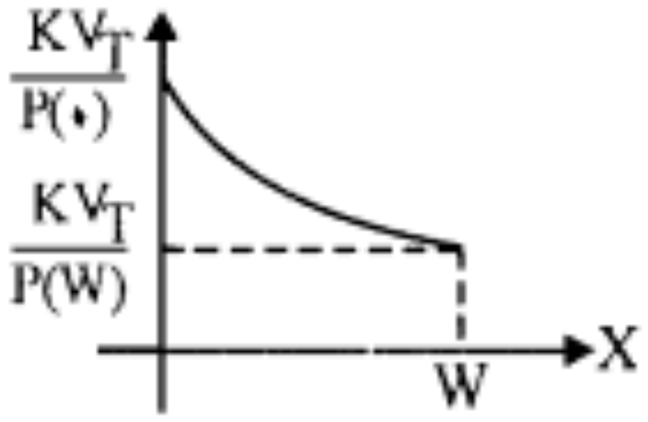
$$p(x)=\begin{cases}\frac{p(W)-p(0)}{W}x+p(0) & ; \quad 0<x\le W\\ p(W) & ; \quad W<x\le L\\ 0 & ; \quad x>L\end{cases}$$



$$J_p=-qD_p\frac{dp(x)}{dx}=\begin{cases}-\frac{p(W)-p(0)}{W}.qD_p & ; \quad x<W\\ 0 & ; \quad x>W\end{cases}$$

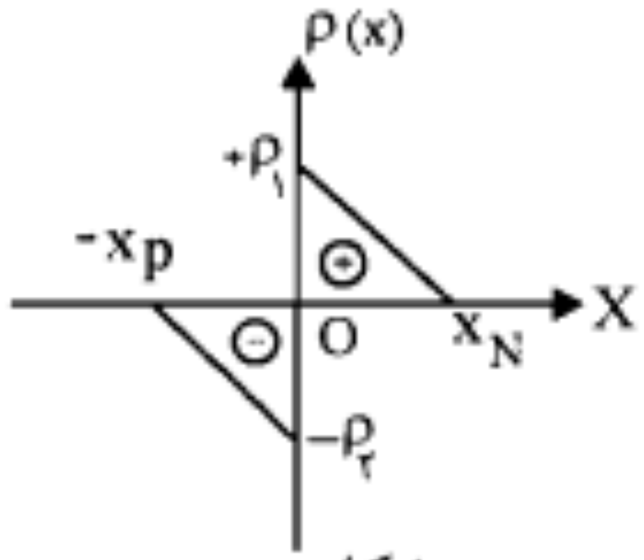
ب) با فرض: $\frac{p(W)-p(0)}{W}\triangleq K$

$$E(x)=\frac{V_T}{p(x)}.\frac{dp(x)}{dx}=\begin{cases}\frac{KV_T}{Kx+p(0)} & ; \quad x<W\\ 0 & ; \quad x>W\end{cases}$$



ج) $V_0=V_T L_n\frac{p(W)}{p(0)}=26\times10^{-3} L_n\, 10^4=239/46 \text{ (mv)}$

۲۰ـ منحنی تغییرات چگالی بار الکتریکی در ناحیه تهی یک پیوند P-N در شکل م ـ ۲۰ آمده است.



شکل م ـ ۲۰

الف) منحنی تغییرات شدت میدان الکتریکی داخلی در طول این ناحیه را به دست آورده و آن را رسم کنید.

ب) منحنی تغییرات پتانسیل الکتریکی در طول ناحیه تهی را به دست آورده و آن را رسم کنید.

ج) بین مقادیر x_P و x_N چه رابطه‌ای برقرار است؟

☑ راه حل:

الف)

$$\frac{d^2v}{dx^2}=-\frac{\rho}{\varepsilon}\rightarrow\frac{d}{dx}\left(\frac{dv}{dx}\right)=-\frac{\rho}{\varepsilon}\rightarrow\frac{d}{dx}(-E)=-\frac{\rho}{\varepsilon}\rightarrow$$

$$\frac{dE}{dx}=\frac{\rho}{\varepsilon}\rightarrow dE=\frac{\rho}{\varepsilon}dx\rightarrow\int dE=\int\frac{\rho}{\varepsilon}dx \qquad (1)$$

www.PnuEB.com

اما تغییرات چگالی بار طبق شکل م - ۲۰ به صورت زیر می‌باشد:

$$-x_p < x < 0 \Rightarrow \frac{\rho - (-\rho_2)}{x - 0} = -\frac{\rho_2}{x_p} \rightarrow \rho = -\left(\frac{\rho_2}{x_p}\right) x - \rho_2$$

$$\rightarrow \rho = -\rho_2 \left(1 + \frac{x}{x_p}\right)$$

$$0 < x < x_N \Rightarrow \frac{\rho - \rho_1}{x - 0} = -\frac{\rho_1}{x_N} \rightarrow \rho = \left(\frac{\rho_1}{x_N}\right) x + \rho_1 \left(1 - \frac{x}{x_N}\right)$$

حال تغییرات ρ در فاصله $-x_p < x < 0$ را در رابطه با I قرار می‌دهیم:

$$E(x) - E(-x_p) = \int_{-x_p}^{x} \frac{-\rho_2}{\varepsilon} \left(\frac{x}{x_p} + 1\right) dx \Rightarrow E(x) = \left[\frac{-\rho_2}{\varepsilon}\left(x + \frac{x^2}{2x_p}\right)\right]_{-x_p}^{x}$$

$$= -\frac{\rho_2}{\varepsilon}\left(x + \frac{x^2}{2x_p}\right) - \frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$

$$x = 0 \rightarrow E(x=0) = \frac{-\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$

$$0 < x < x_N \Rightarrow E(x) - E(x=0) = \int_0^x \frac{\rho_1}{\varepsilon}\left(1 - \frac{x}{x_N}\right) dx \quad \rightarrow E(x) + \frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p = \frac{\rho_1}{\varepsilon}\left(x - \frac{x^2}{2x_N}\right)$$

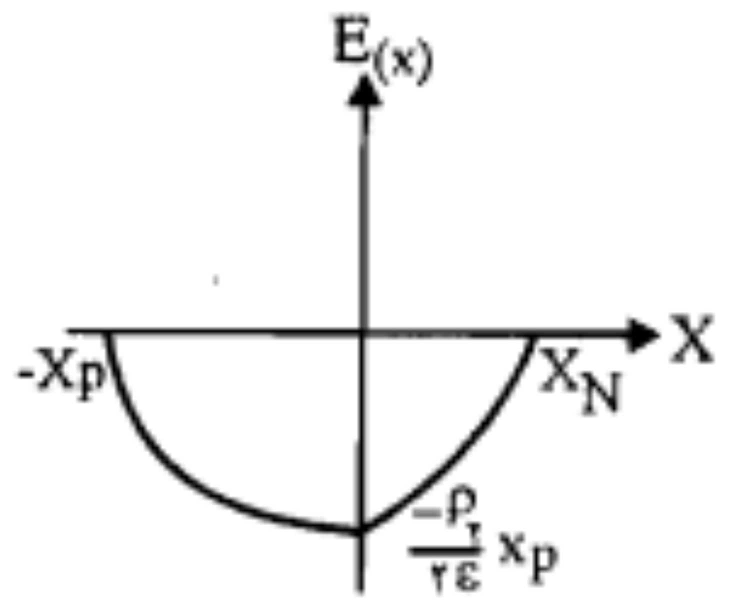
$$\rightarrow E(x) = \frac{\rho_1}{2\varepsilon}\left(x - \frac{x^2}{2x_N}\right) - \frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$

$$x = x_N \Rightarrow E(x_N) = \frac{\rho_1}{\varepsilon}\left(x_N - \frac{x_N^2}{2x_N}\right) - \frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$

$$\Rightarrow E(x_N) = \frac{\rho_1}{2\varepsilon} x_N - \frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$

شکل را با فرض $\rho_1 x_N = \rho_2 x_p$ رسم می‌کنیم یعنی در $x = x_N$ داریم $E = 0$ و همچنین داریم

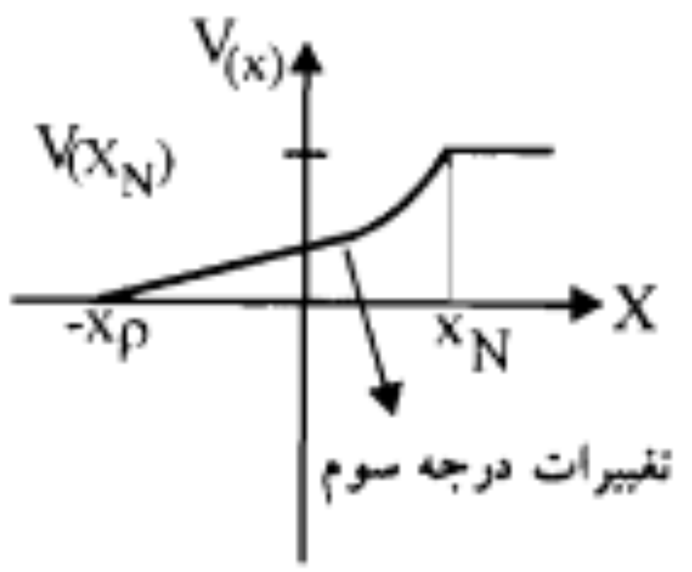
$$E(x=0) = -\frac{\rho_2}{2\varepsilon} x_p$$



ب) داریم: $E = -\frac{dv}{dx}$: برای $x < -x_p$ در E تغییرات نداشتیم پس v ثابت می‌باشد که این مقدار برابر صفر

در $x > x_N$ فرض می‌کنیم $\rho_1 x_N = \rho_2 x_p$

$\Leftarrow E(x) = 0$ و لذا $v(x)$ ثابت می‌باشد.



ج) در $x = x_N$ باید $E(x) = 0$ گردد برای برآورده شدن این شرط:

$$E(x_N) = 0 \Rightarrow \frac{\rho_1 x_N}{2\varepsilon} - \frac{\rho_2 x_p}{2\varepsilon} = 0$$

$$\rightarrow \rho_1 x_N = \rho_2 x_p \rightarrow \frac{x_p}{x_N} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

www.*PnuEB*.com
www.*PnuEB*.com

فصل ۲
دیود پیوندی

۱ـ الف) مطلوب است محاسبه مقادیر I_s و η برای یک دیود پیوندی که در ولتاژ مستقیم ۰/۷ ولت، جریان 1 mA و در ولتاژ ۰/۸ ولت، جریان 10 mA از آن عبور می‌کند.

ب) مقاومت دینامیکی این دیود در ولتاژهای مستقیم ۰/۷ و ۰/۸ ولت چقدر است؟

☑ **راه حل:** در بایاس مستقیم می‌توان رابطه جریان ـ ولتاژ دیود پیوندی را تقریباً به صورت زیر نوشت. (یعنی از یک می‌توان صرفنظر کرد)

$$I_D = I_s e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}$$

الف)

$$I_{D_1} = I_s e^{\frac{V_{D_1}}{\eta V_T}} \quad , \quad I_{D_2} = I_s e^{\frac{V_{D_2}}{\eta V_T}} \qquad (a)$$

$$\frac{I_{D_1}}{I_{D_2}} = e^{\frac{V_{D_1} - V_{D_2}}{\eta \times V_T}} \Rightarrow \frac{1}{10} = e^{\frac{0/7 - 0/8}{\eta\ 26 \times 10^{-3}}} \Rightarrow \boxed{\eta = 1/67}$$

با جایگذاری ۱/۶۷ = η در یکی از روابط (a) می‌توان I_s را محاسبه نمود. مثلاً:

$$I_s = \frac{I_{D_1}}{e^{\frac{V_{D_1}}{\eta V_T}}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{e^{(\frac{0/7}{1/67 \times 26 \times 10^{-3}})}} = 0/1\ (nA)$$

ب) مقاومت دینامیکی از رابطه (۲ ـ ۶) محاسبه می‌شود. بنابراین:

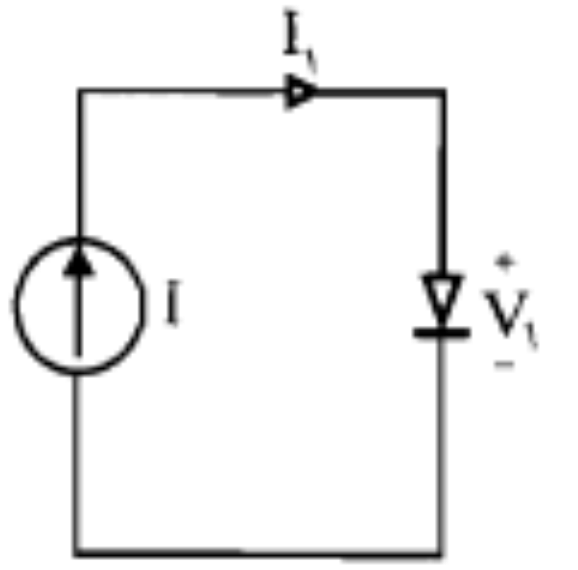
$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D + I_s} = \frac{\eta V_T}{I_s e^{(\frac{V_D}{\eta V_T})}}$$

$$I_{D_1} = 1mA \Leftarrow \quad r_{d_1} = \frac{1/67 \times 26 \times 10^{-3}}{10^{-3} + 0/1 \times 10^{-9}} = 43/42\ \Omega$$

$$I_{D_2} = 10mA \Leftarrow \quad r_{d_2} = \frac{1/67 \times 26 \times 10^{-3}}{10^{-2} + 10^{-10}} = 4/34\ \Omega$$

۲ ـ یک دیود پیوندی در یک مدار، توسط یک منبع جریان I تغذیه می‌شود. اگر این دیود با یک دیود مشابه خود موازی شود ولتاژ مستقیم دو سر آن چه تغییری می‌کند؟

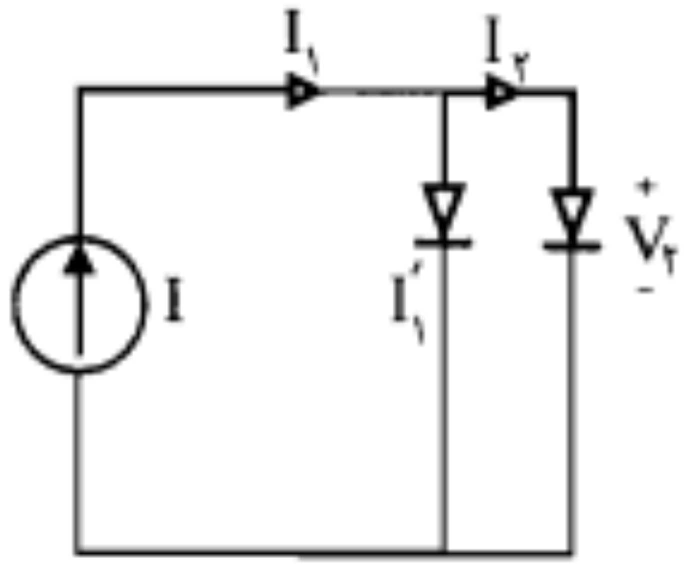
☑ **راه حل:** برای یک دیود تنها می‌توان مدار را مطابق شکل (a) فرض کرد بنابراین داریم:



شکل (a)

$$I_1 = I = e^{\frac{V_1}{\eta V_T}}$$

اگر دیود مشابهی با دیود اول موازی شود مطابق شکل (b) می‌توان نوشت:



شکل (b)

$$I_2 = I'_1 = \frac{I}{2} = e^{\frac{V_2}{\eta V_T}}$$

با توجه به دو رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{2} = e^{\frac{V_2 - V_1}{\eta V_T}} \Rightarrow \boxed{V_2 - V_1 = -\eta V_T Ln\ (2)}$$

www.PnuEB.com

۳ـ جریان اشباع معکوس دیودی به ازای هر $۱۰^{\circ c}$ افزایش دما دو برابر می‌شود.

الف) چه افزایش دمایی این جریان را تا ۳۰ برابر مقدار اولیه‌اش در دمای معمولی بالا می‌برد؟

ب) چه تغییری در دما (نسبت به $۲۵^{\circ c}$) باعث کاهش جریان اشباع معکوس تا سطح ۰/۱ مقدار اولیه‌اش در دمای معمولی می‌شود؟

☑ **راه حل:** می‌دانیم I_s تابعی از دما (θ) می‌باشد اگر به ازای هر $۱۰^{\circ c}$ افزایش دما I_s دو برابر شود پس می‌توان رابطه I_s را در دو دمای متفاوت به صورت زیر نوشت:

$$I_s(\theta_۲) = I_s(\theta_۱)\times ۲^{\left[\frac{\theta_۲-\theta_۱}{۱۰}\right]}$$

الف)
$$I_s(\theta_۲)=۳۰\, I_s(\theta_۱) \to \frac{I_s(\theta_۲)}{I_s(\theta_۱)} = ۳۰ = ۲^{\frac{\theta_۲-\theta_۱}{۱۰}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_۲-\theta_۱ = ۴۹/۰۶^\circ c}$$

ب)
$$I_s(\theta_۲) = ۰/۱\, I_s(۲۵^\circ)$$

$$\frac{I_s(\theta_۲)}{I_s(۲۵^\circ c)} = \frac{۱}{۱۰} = ۲^{\frac{\theta_۲-۲۵}{۱۰}} \Rightarrow \theta_۲ - ۲۵ = -۳۱/۲۱^\circ c$$

$$\boxed{\theta_۲ = -۸/۲۱^\circ c}$$

۴ـ الف) در دمای معمولی در چه ولتاژی جریان اشباع معکوس یک دیود سیلیکنی به ۹۵ درصد مقدار اشباع آن می‌رسد؟

ب) نسبت جریان دیود با ولتاژ مستقیم ۰/۱ ولت را به جریان دیود با همان مقدار ولتاژ معکوس به‌دست آورید.

ج) با فرض $I_s = ۱۰\ nA$ جریان دیود را برای ولتاژهای ۰/۵ و ۰/۶ و ۰/۷ ولت محاسبه نمایید.

☑ **راه حل:**

$$I_D = \frac{۹۵}{۱۰۰} I_s$$

الف)

برای سیلیکن می‌توان $\eta \cong ۲$

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}-۱) \Rightarrow ۰/۹۵ = e^{\frac{V_D\times ۱۰^۳}{۲\times ۲۶}} - ۱$$

$$\Rightarrow e^{\frac{۱۰۰۰\, V_D}{۲\times ۲۶}} = ۱/۹۵ \Rightarrow \boxed{V_D = ۳۴/۷۲\ mv}$$

ب) در بایاس مستقیم $V_D = ۰/۱ \Leftarrow$

$$I_۱ = I_s(e^{\frac{-۳۴/۷۲}{۲\times ۲۶}} - ۱)$$

در بایاس معکوس $V_D = -۳۴/۷۲\ mv \Leftarrow$

$$I_۲ = I_s(e^{\frac{-۳۴/۷۲}{۲\times ۲۶}} - ۱)$$

$$\frac{I_۱}{I_۲} = \frac{\left|e^{\frac{۱۰۰}{۵۲}}-۱\right|}{\left|e^{\frac{-۳۴/۷۲}{۵۲}}-۱\right|} \Rightarrow \frac{I_۱}{I_۲} = ۱۱/۹۹$$

ج)

$$I_D(V_D=۰/۵) = ۱۰\times ۱۰^{-۹}(e^{\frac{۰/۵\times ۱۰^۳}{۵۲}}-۱) = ۰/۱۴۹\ (mA)$$

$$I_D(V_D=۰/۶) = ۱۰^{-۸}(e^{\frac{۶۰۰}{۵۲}}-۱) = ۱/۰۲۵\ (mA)$$

$$I_D(V_D=۰/۷) = ۱۰^{-۸}(e^{\frac{۷۰۰}{۵۲}}-۱) = ۷/۰۲\ (mA)$$

۵ـ الف) در صورتی که جریان اشباع معکوس یک دیود برابر ۱ nA باشد به ازای چه ولتاژ مستقیمی جریان دیود برابر $۰/۵\mu A$ خواهد شد؟

ب) چنانچه ولتاژ محاسبه شده در بند (الف) را به یک دیود ژرمانیم در جهت مستقیم اعمال کنیم چه جریانی از آن عبور خواهد کرد؟ (فرض کنید $I_s = ۲۰\mu A$ است.)

☑ **راه حل:**

الف) $V_D = ? \Leftarrow I_D = ۰/۵\mu A \quad , \quad I_s = ۱\ nA \quad , \quad \eta = ۲$

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}-۱) \Rightarrow ۰/۵\times ۱۰^{-۶} = ۱۰^{-۹}(e^{\frac{۱۰۰۰\, V_D}{۵۲}}-۱)$$

$$\Rightarrow V_D = ۰/۳۲۳\ (Volt)$$

ب) $I_D = ? \Leftarrow V_D = ۰/۳۲۳^v \; , \; I_s = ۲۰\mu A \; , \; \eta = ۲$

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}-۱) = ۲۰\times ۱۰^{-۶}(e^{\frac{۰/۳۲۳\times ۱۰۰۰}{۵۲}}-۱) = ۹/۹۴۹\ (mA)$$

www.PnuEB.com

۶ـ از یک دیود سیلیکنی در دمای $k°۳۰۰$ و در ولتاژ ۰/۷ ولت جریان ۵ mA عبور می‌کند. چنانچه ولتاژ را تا حد ۰/۸ ولت افزایش دهیم جریان دیود چقدر خواهد شد؟ برای این دیود I_s چقدر است؟

☑ **راه حل:**

برای محاسبه جریان I_s مورد نیاز است. مقدار I_s را می‌توان با توجه به داده‌های ابتدای مسئله محاسبه نمود به صورت زیر:

$$I_s = ? \Leftarrow I_D = ۵mA \;,\; V_D = ۰/۷$$

$$I_D = ۵\times ۱۰^{-۳} = I_s(e^{\frac{۰/۷\times ۱۰۰۰}{۵۲}} - ۱) \Rightarrow I_s = ۷/۱۲\ (nA)$$

حال با توجه به I_s محاسبه شده، برای $V_D = ۰/۸v$ داریم:

$$I_D = I_s(e^{\frac{۰/۸\times ۱۰۰۰}{۵۲}} - ۱) = ۷/۱۲\times ۱۰^{-۹}\times ۴/۸\times ۱۰^{۶} = ۳۴/۲\ (mA)$$

۷ـ یک دیود سیلیکنی در ولتاژ مستقیم ۰/۷ ولت در حال کار است. چنانچه دما از ۲۵^{oc} به -۵۵^{oc} کاهش یابد جریان دیود به چه میزان تغییر خواهد کرد؟ ($V_T = ۲۶\,mv$) ($\eta = ۱$)

☑ **راه حل:**

واضح است که با تغییر دما V_T و هم I_s تغییر می‌نمایند.

برای V_T جدید داریم:

$$V_T \cong \frac{T_۲^{(ok)}}{۱۱۵۰۰}$$

$$T_۲ = -۵۵ + ۲۷۳ = ۲۱۸°k \Rightarrow V_{T_۲} \cong \frac{۲۱۸}{۱۱۵۰۰} = ۱۸/۹۵\ (mv)$$

$$I_{S_۲}(T_۲) = I_S(T_۱)\times ۲^{\frac{T_۲ - T_۱}{۱۰}} \Rightarrow \frac{I_{S_۲}}{I_{S_۱}} = ۲^{\frac{-۵۵-۲۵}{۱۰}} = ۲^{-۸}$$

$$I_{D_۱} = I_{S_۱}(e^{\frac{۰/۷\times ۱۰۰۰}{\eta\times ۲۶}}) \qquad I_{D_۲} = I_{S_۲}(e^{\frac{۰/۷\times ۱۰۰۰}{\eta\times ۱۸/۹۵}}) \Rightarrow \frac{I_{D_۲}}{I_{D_۱}} = \frac{I_{S_۲}}{I_{S_۱}}\times e^{۷۰۰(\frac{۱}{۱۸/۹۵} - \frac{۱}{۲۶})}$$

$$\Rightarrow \frac{I_{D_۲}}{I_{D_۱}} = ۲^{-۸}\times e^{۷۰۰}(\frac{۱}{۱۸/۹۵} - \frac{۱}{۲۶}) = ۷۹/۴۲$$

۸ـ ثابت کنید که در یک پیوند P-N آلیاژی را با ($N_A \ll N_D$) عرض ناحیه تهی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = \left[\frac{۲\varepsilon\mu V_j}{\delta_p}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

که در آن V_j اختلاف پتانسیل پیوند با وجود ولتاژ خارجی V_d است.

☑ **راه حل:**

از فصل اول داریم:

$$W = \left[\frac{۲\varepsilon V_j}{q}\left(\frac{۱}{N_A} + \frac{۱}{N_D}\right)\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

چون $N_A \ll N_D$ پس می‌توان از $\frac{۱}{N_D}$ در مقابل $\frac{۱}{N_A}$ صرفنظر کرد. بنابراین داریم:

$$W = \left[\frac{۲\varepsilon V_j}{qN_A}\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (a)$$

از طرفی دیگر داریم:

$$\sigma_p = qN_A\mu_p \Rightarrow qN_A = \frac{\sigma_p}{\mu_p} \qquad (b)$$

$$(a)\ ,\ (b) \Rightarrow W = \left[\frac{۲\varepsilon\mu_p V_j}{\sigma_p}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

۹ـ برای یک دیود در دمای ۱۲۵^{oc}، جریان اشباع معکوس برابر $۰/۱\,\mu A$ است.

الف) در دمای ۱۰۵^{oc} مقاومت دینامیکی را در ولتاژ مستقیم ۰/۸ ولت به دست آورید.

ب) در همان دما مقاومت دینامیکی را در ولتاژ معکوس ۰/۸ ولت محاسبه نمایید.

☑ **راه حل:**

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_s e^{(\frac{V_D}{\eta V_T})}}$$

الف) واضح است که در دمای ۱۰۵^{oc} مقدار I_s عوض می‌شود. یعنی

$$I_s(۱۰۵^{oc}) = I_s(۱۲۵^{oc})\,.\,۲^{\frac{۱۰۵-۱۲۵}{۱۰}} = ۰/۱\times ۱۰^{-۶}\times ۲^{-۲} = ۲۵\,\mu A$$

$$r_d(V_D = ۰/۸) = \frac{\eta V_T}{I_D + I_s} = \frac{۲\times ۲۶\times ۱۰^{-۳}}{I_s(e^{\frac{۸۰۰}{۵۲}})} = ۰/۴۳۳\ \Omega$$

www.PnuEB.com

ب) در بایاس معکوس $V_D = -۰/۸V$

$$r_d\,(V_D = -۰/۸) = \frac{\eta V_T}{I_s\,(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}})} = \frac{۲\times ۲۶\times ۱۰^{-۳}}{۲۵\times ۱۰^{-۹}\,(e^{-\frac{۸۰۰}{۲۶}})} \cong ۱۰^{۱۳}\,\Omega$$

۱۰ ـ رابطه ۲ ـ ۱۱ را به دست آورید.

راهنمایی: برای این کار می‌توانید از تعریف ظرفیت خازنی $C_T = \frac{dQ}{dV_r}$ این گونه استفاده نمایید که ابتدا آن را به شکل $\frac{dQ}{dV_r} = \frac{dQ}{dx_p}\frac{dx_p}{dV_r}$ نوشته و به جای $\frac{dQ}{dx_p}$ مقدار معادلش $(Aq\,N_A)$ را قرار دهید و سپس $\frac{dx_p}{dV_r}$ را با استفاده از رابطه ۱ ـ ۲۷ که در آن $V_۰$ را $V_r + V_۰$ جایگزین نموده‌اید، محاسبه کنید.

راه حل:

$$C_T = \frac{dQ}{dV_r} = \frac{dQ}{dx_p}\cdot\frac{dx_p}{dV_r} \qquad (a)$$

$$\frac{dQ}{dx_p} = qN_A \qquad (b)$$

$$x_p = \left[\frac{۲\varepsilon\,(V_۰ + V_r)}{qN_A\,(۱+\frac{N_A}{N_D})}\right]^{\frac{۱}{۲}} \Rightarrow \frac{dx_p}{dV_r} = \frac{۱}{۲\sqrt{V_۰ + V_r}}\cdot\sqrt{\frac{۲\varepsilon}{qN_A\,(۱+\frac{N_A}{N_D})}} \qquad (c)$$

اگر (b) و (c) را در (a) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$C_T = qN_A\cdot\frac{۱}{۲\sqrt{V_۰\,(۱+\frac{V_r}{V_۰})}}\times\sqrt{\frac{۲\varepsilon N_D}{qN_A\,(N_A+N_D)}} = \sqrt{\frac{q^۲N_A^۲\,۲\varepsilon N_D}{۴V_۰\,(۱+\frac{V_r}{V_۰})\,.\,qN_A\,(N_A+N_D)}}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{q\varepsilon N_A N_D}{۲V_۰\,(N_A+N_D)}}\cdot\frac{۱}{\sqrt{۱+\frac{V_r}{V_۰}}} \quad , \quad \sqrt{\frac{q\varepsilon N_A N_D}{۲V_۰\,(N_A+N_D)}} = C_{T_۰}$$

$$\boxed{C_T = C_{T_۰}\,(۱+\frac{V_r}{V_۰})^{\frac{-۱}{۲}}}$$

۱۱ ـ برای یک دیود سیلیکنی، $N_D = ۱۰^{۱۵}\,cm^{-۳}$ و $N_A \gg N_D$ و $V_۰ = ۰/۵V$ است. در صورتی که به این دیود یک ولتاژ معکوس ۱۰ ولتی اعمال شود، مطلوب است:

الف) عرض ناحیه تهی (W)

ب) مقدار شدت میدان الکتریکی در محل پیوند

ج) مقدار ظرفیت خازنی در سانتیمتر مربع

راه حل:

چون $N_A \gg N_D$ نتیجه می‌شود که $x_N \gg x_p \Leftarrow W \cong x_N$

الف) همچنین داریم: $V_۰ = ۰/۵$, $V_r = ۱۰$, $\varepsilon_۰ = ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}$

$$W = \left[\frac{۲\varepsilon\,(V_۰+V_r)}{q}\times(\frac{۱}{N_A}+\frac{۱}{N_D})\right]^{\frac{۱}{۲}} = (\frac{۲\times ۱۲\times ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}\times ۱۰/۵}{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}}\times\frac{۱}{۱۰^{۱۵}})^{\frac{۱}{۲}}$$

$W = ۳/۷۳\times ۱۰^{-۳}\ mm$ یا $۳/۷۳\,\mu m$

ب)

$$|E_۰| = \frac{qN_D x_N}{\varepsilon} \text{ و } N_D = ۱۰^{۲۱}\,(m^{-۳})$$

$$E_۰ = \frac{qN_D W}{\varepsilon} = \frac{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۰^{۲۱}\times ۳/۷۳\times ۱۰^{-۶}}{۱۲\times ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۲}} = ۵۶/۱۷\times ۱۰^{۵}\,\frac{v}{m}$$ یا

$۵۶/۱۷\times ۱۰^{۳}\,(\frac{v}{cm})$

ج) چون N_A از N_D بسیار بزرگتر است پس از $\frac{۱}{N_A}$ صرفنظر می‌کنیم.

$\varepsilon_۰ = ۸/۸۵۴\times ۱۰^{-۱۴}\,(\frac{F}{cm})$

$$C_{T_۰} = (\frac{q\varepsilon N_A N_D}{۲V_۰\,(N_A+N_D)})^{\frac{۱}{۲}} = (\frac{۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}\times ۱۲\times ۸/۵۴\times ۱۰^{-۱۴}}{۲\times ۰/۵\times\frac{۱}{۱۰}})^{\frac{۱}{۲}} = ۱/۳\times ۱۰^{-۸}\,(\frac{F}{cm^۲})$$

$$C_T = C_{T_۰}\cdot\frac{۱}{\sqrt{۱+\frac{V_r}{V_۰}}} = ۱/۳\times ۱۰^{-۸}\times\frac{۱}{\sqrt{۱+۲۰}} = ۲/۸۳\,\frac{nF}{cm^۲}$$

۱۲ ـ الف) ثابت کنید که برای یک پیوند آلیاژی P-N از جنس سیلیکن (با $N_A \ll N_D$)، ظرفیت خازنی

www.PnuEB.com
www.PnuEB.com

ناحیه تهی (C_T) بر حسب پیکوفاراد بر سانتیمتر مربع از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_T = 2.913 \times 10^{-4} \left[\frac{N_A}{V_j}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ب) در صورتی که مقاومت ویژه (ρ) بلور برابر $4\,\Omega\text{-cm}$، اختلاف پتانسیل تماس V_0 برابر ۰/۳ ولت، ولتاژ خارجی اعمال شده ۴ ولت و سطح مقطع دایره‌ای به قطر ۱/۲۵mm باشد، مقدار C_T را محاسبه نمایید.

☑ **راه حل:**

الف)

$$C = C_{T_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{V_r}{V_0}}} = \sqrt{\frac{q\varepsilon}{2V_0\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)} \cdot \frac{V_0}{V_0+V_r}}$$

$$V_r + V_0 = V_j$$

$$\varepsilon_r = 12\ ,\ \varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \left(\frac{F}{cm}\right)$$

$$C = \sqrt{\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 12 \times 8.854 \times 10^{-14}}{2 \times \frac{1}{N_A} . V_j}} = 2.91 \times 10^{-16} \sqrt{\frac{N_A}{V_j}} \ \left(\frac{F}{cm^2}\right)$$

یا $2.91 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{N_A}{V_j}} \left(\frac{PF}{cm^2}\right)$

ب)

$$\mu = 500\ ,\ \ \delta = N_A q\mu \Rightarrow N_A = \frac{\sigma}{q\mu} = \frac{1}{\rho q\mu} = \frac{1}{4 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 500}$$

$$\Rightarrow N_A = 3.125 \times 10^{15}$$

$$V_j = V_0 + V_r = 4 + 0.3 = 4.3V$$

$$C_T = 2.91 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{3.125 \times 10^{15}}{4.3} \frac{PF}{cm^2}} = 7844.83 \times 10^{-9} \left(\frac{F}{cm^2}\right)$$

سطح مقطع $= \pi R^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{1.25 \times 10^{-1}}{2}\right)^2 = 0.0122\ cm^2$

$$C_T = 7844.83 \times 10^{-9} \times 0.0122 = 95.86\ (\rho F)$$

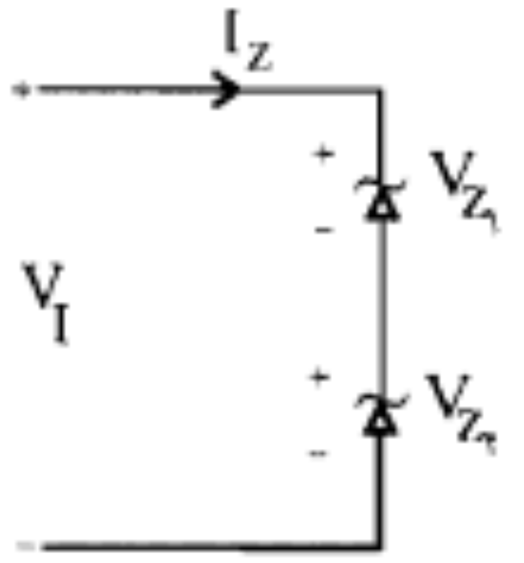
۱۳ ـ در شکل م ـ ۱۳ جریان اشباع معکوس دو دیود ۱ و ۲ میکروآمپر است. ولتاژ شکست دو دیود مساوی برابر ۱۰۰ ولت است.

الف) جریان و ولتاژ هر دیود را برای ولتاژهای ورودی ۸۰ و ۱۲۰ ولت به‌دست آورید.

ب) برای حالتی که هر دیود با یک مقاومت $8M\Omega$ موازی شود، بند (الف) را حل نمایید.

☑ **راه حل:**

الف) $V_I = 80^V$



شکل م-۱۳

چون دو دیود با هم سری هستند پس جریان هر دو با هم مساوی است.

$$2 \times 10^{-6}\left(e^{\frac{V_2 \times 10^3}{52}} - 1\right) = 10^{-6}\left(e^{\frac{V_1 \times 1000}{52}} - 1\right)$$

$$2e^{\frac{V_2 \times 1000}{52}} - e^{\frac{V_1 \times 100}{52}} = 1 \qquad (a)$$

$$V_1 + V_2 = 80 \qquad (b)$$

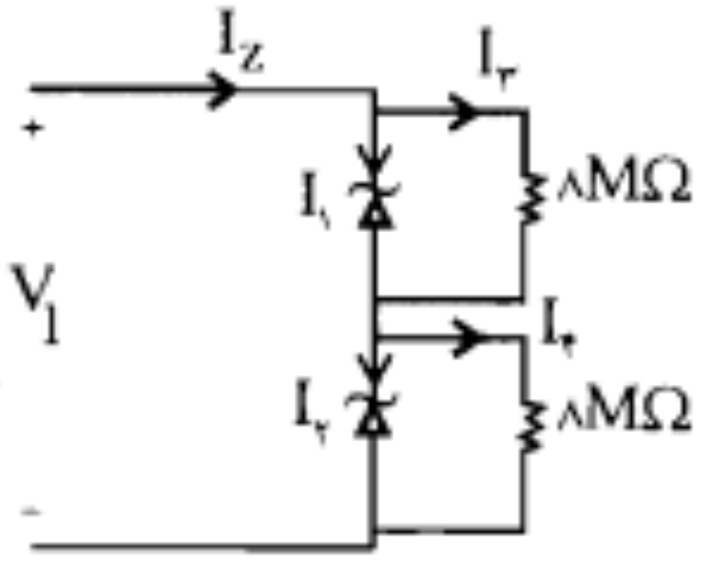
باید معادله (a) و (b) را حل کنیم. سپس از حل: $V_1 = 79.96\ V$ و $V_2 = 36\ mv$

$$I_2 = I_1 = 10^{-6}\left(e^{-\frac{79.96 \times 10^3}{52}} - 1\right) \simeq 1\mu A$$

اگر $V_I = 120$ همانند روش بالا خواهیم داشت:

$V_1 = 100v$ و $V_2 = 20v$ در این حالت چون $V_1 = 100v$ شده است، می‌شکند و جریان مدار $2\mu A$ خواهد شد.

ب) در این حالت مدار مشابه شکل مقابل خواهد شد.



با اعمال KVL در حلقه مربوط به مقاومت‌ها داریم:

$$V_I = 8I_3 + 8I_4 = 80 \quad \Leftarrow \quad V_I = 80$$

$$\boxed{I_3 + I_4 = 10\mu A} \qquad (a)$$

از طرفی داریم: $\boxed{I_1 + I_3 = I_2 + I_4}$ (b)

چون هر دو دیود به‌صورت معکوس تغذیه شده‌اند داریم:

$$I_1 = 1\mu A\ ,\ I_2 \simeq 2\mu A$$

www.PnuEB.com

بنابراین:

$I_۴ = ۴/۵\mu A \quad , \quad I_۳ = ۵/۵\mu A$

$V_۱ = ۸\times ۱۰^۶ \times ۵/۵\times ۱۰^{-۶} = ۴۴\,V \quad , \quad V_۲ = ۸\times ۱۰^۶ \times ۴/۵\times ۱۰^{-۶} = ۳۶\,V$

در حالتی که $V_I = ۱۲۰$ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} I_۳ + I_۴ = ۱۵\mu A \\ I_۱ + I_۲ = I_۳ + I_۴ \end{cases}$$

مشابه حالت قبل:

$I_۱ = ۱\mu A \quad , \quad I_۲ = ۲\mu A$

$I_۳ = ۸\mu A \quad , \quad I_۴ = ۶\mu A$

$V_۱ = ۸\times ۸ = ۶۴\,V \quad , \quad V_۲ = ۸\times ۷ = ۵۶\,V$

مشاهده می‌شود که در این حالت به علت موازی شدن مقاومت‌ها هیچکدام از دیودها نمی‌شکنند.

۱۴ ـ ظرفیت خازنی ناحیه تهی یک پیوند P-N ژرمانیم با سطح مقطع $۰/۲۵\,mm^۲$ و عرض ناحیه تهی $۳\times ۱۰^{-۴}\,cm$ را به‌دست آورید.

☑ **راه حل:**

برای دیود ژرمانیم داریم: $\varepsilon_r = ۱۶$

$A = ۰/۲۵\,mm^۲ = ۰/۲۵\times ۱۰^{-۶}\,m^۲$

$W = ۳\times ۱۰^{-۴}\,cm = ۳\times ۱۰^{-۶}\,(m)$

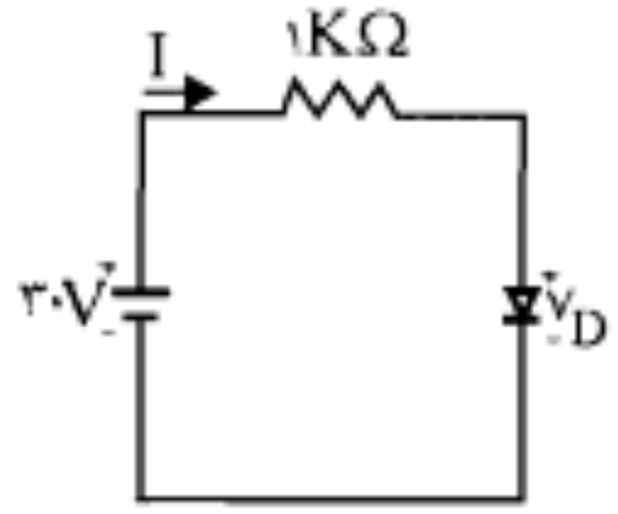
$C = \frac{\varepsilon A}{W} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_۰ A}{W} = \frac{۱۶\times ۸/۸۴\times ۱۰^{-۱۲}\times ۰/۲۵\times ۱۰^{-۶}}{۳\times ۱۰^{-۶}} = ۱۱/۸\times ۱۰^{-۱۲}\,F$ یا $۱۱/۸\,(PF)$

۱۵ ـ در مدار شکل م ـ ۱۵ دیود ژرمانیم در دمای معمولی دارای جریان اشباع معکوس $۱۰\,\mu A$ ، ولتاژ شکست ۱۰۰۷ و مقاومت اهمی ناچیز است. جریان مدار را در حالت‌های زیر به دست آورید:

الف) دیود به صورت مستقیم بایاس شده باشد.

ب) دیود به صورت معکوس بایاس شده باشد.

☑ **راه حل:**



شکل م-۱۵

الف) در حالت بایاس مستقیم با اعمال KVL در حلقه مدار خواهیم داشت:

$$۳۰ = I\times ۱۰^۳ + V_D \qquad (a)$$

از طرفی برای خود دیود نیز داریم:

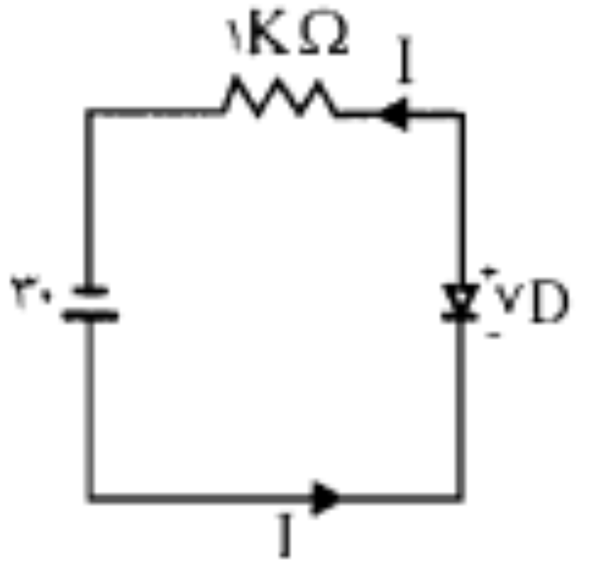
$$I = ۱۰\times ۱۰^{-۶}\,(e^{\frac{V_D\times ۱۰^۳}{۵۲}} - ۱) \qquad (b)$$

با جایگذاری (b) در (a) یک معادله غیرخطی بر حسب V_D به دست می‌آید با حل این معادله V_D را به دست می‌آوریم:

$$۳۰ = ۰/۰۱\times (e^{\frac{۱۰۰۰ V_D}{۵۲}} - ۱) + V_D$$

$$V_D = ۰/۱۸\,V \Rightarrow I = \frac{۳۰ - V_D}{۱۰^۳} = \frac{۳۰ - ۰/۱۸}{۱۰^۳} = ۲۹/۸۲\,(mA)$$

ب) در این حالت مدار مطابق شکل روبرو خواهد بود:



$$I\times ۱۰^۳ - V_D = ۳۰$$

$$I = ۱۰\times ۱۰^{-۶}\,(e^{\frac{۱۰۰۰ V_D}{۵۲}} - ۱)$$

باز هم اگر معادله روبرو حل شود خواهیم داشت:

$$V_D \cong -۲۹/۹۹ \Rightarrow I = \frac{۳۰ + V_D}{۱۰^۳} = \frac{۰/۰۱}{۱۰^۳} = ۱۰\,\mu A$$

۱۶ ـ یک دیود سیلیکنی با یک مقاومت $۱۰\,M\Omega$ سری شده و توسط یک منبع ولتاژ ۱ ولتی به صورت معکوس بایاس شده است.

الف) ولتاژ دو سر دیود را به دست آورید.

ب) در صورتی که جای قطب‌های منبع ولتاژ را عوض کنیم، ولتاژ دو سر دیود چقدر خواهد شد؟

☑ **راه حل:**

الف) چون مقدار جریان اشباع معکوس را نداریم آن را $I_s = ۱nA$ در نظر می‌گیریم و با توجه به قسمت (ب) مسئله قبل داریم

$I_D = I_s \rightarrow I_D = ۱nA$

$V_R = R\,I_D = ۱۰\,M\Omega \times ۱nA = ۰/۰۱V$ ولتاژ دو سر مقاومت

ولتاژ دو سر دیود $V_D =$ ولتاژ منبع - ولتاژ دو سرمقاومت $\rightarrow V_D = ۱ - ۰/۰۱ = ۰/۹۹\,V$

ب) ابتدا مقدار I_D را از حل دو معادله زیر به دست می‌آوریم:

$$(۱) \quad ۱V = ۱۰ I_D + V_D \rightarrow V_D = ۱ - ۱۰ I_D$$

$$(۲) \quad I_D = ۱۰^{-۳}(e^{\frac{V_D}{۵۲}} - ۱)$$

www.PnuEB.com

با جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۲) مقدار I_D به دست می‌آید.

$$(۱)\ ,\ (۲) \to I_D = ۰/۰۷۷\,\mu A$$

$$V_R = ۱۰\,M\Omega \times ۰/۰۷۷\mu A = ۰/۷۷\Omega \to V_D = ۱ - V_R = ۱ - ۰/۷۷ = ۰/۲۳V$$

۱۷ ـ یک دیود سیلیکنی در دمای $۳۰۰^\circ k$ و در ولتاژ ۰/۷ ولت، دارای جریان $۵\ mA$ است.

الف) جریان اشباع معکوس را محاسبه نمایید.

ب) اگر ولتاژ به ۰/۸ ولت برسد جریان چقدر خواهد شد؟

ج) چه تغییر ولتاژی در ناحیه هدایت باعث ده برابر شدن جریان می‌شود؟ (در دمای $۳۰۰^\circ K$)

☑ **راه حل:**

الف) با توجه به رابطه مقابل داریم:

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - ۱) \to ۵mA = I_s(e^{\frac{۷۰۰}{۲\times ۲۶}} - ۱) \to I_s = ۷/۱۲\ nA$$

ب)

$$I_D = ۷/۱۲\,nA\,(e^{\frac{۸۰۰}{۵۲}} - ۱) = ۳۴/۱۹\ mA$$

ج)

$$\frac{I_۲}{I_۱} = ۱۰ \to \frac{I_۲}{I_۱} = ۱۰ = \frac{e^{\frac{V_۲}{۵۲}} - ۱}{e^{\frac{V_۱}{۵۲}} - ۱} = \frac{e^{\frac{V_۲}{۵۲}}}{e^{\frac{V_۱}{۵۲}}} = e^{\frac{V_۲ - V_۱}{۵۲}}$$

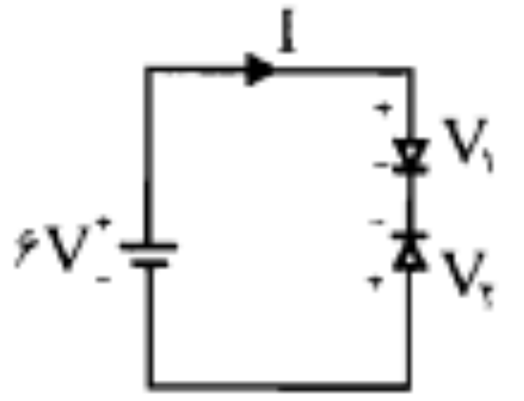
$$\to (Ln\ ۱۰)\times ۵۲ = V_۲ - V_۱ \to V_۲ - V_۱ = ۱۱۹\ mV$$

۱۸ ـ در مدار شکل م ـ ۱۸ دیودها مشابه، از نوع سیلیکن و دارای $I_s = ۱۰\ nA$ می‌باشند.

الف) در صورتی که ولتاژ شکست دیودها برابر ۱۰ ولت باشد، جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود را به دست آورید.

ب) با فرض اینکه ولتاژ شکست دیودها برابر ۵ ولت باشد جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود چقدر خواهد بود؟

☑ **راه حل:**



شکل م-۱۸

الف) چون دو دیود سری هستند پس جریان آنها برابر و ولتاژ آنها متفاوت است.

$$I = I_s = ۱۰\ nA$$

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_۱}{۵۲}} - ۱) \to ۱۰ = ۱۰(e^{\frac{V_۱}{۵۲}} - ۱) \to ۱ = e^{\frac{V_۱}{۵۲}} - ۱ \to$$

$$۲ = e^{\frac{V_۱}{۵۲}} \to \frac{V_۱}{۵۲} = Ln\ ۲ \to V_۱ = ۵۲\,Ln\,۲ = ۳۶\ mV$$

$$V_۲ = ۶^V - ۰/۰۳۶^V = ۵/۹۶۴\ V$$

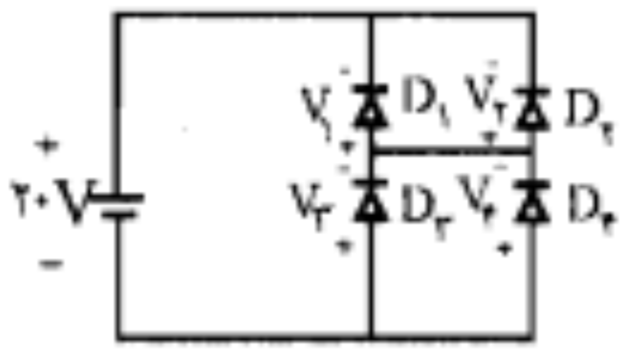
ب)

$$V_۲ = ۵V \to V_۱ = ۶ - ۵ = ۱^V$$

$$I = I_۱ = ۱۰^{nA}(e^{\frac{۶^V - ۵^V}{۰/۰۵۲^V}} - ۱) = ۲/۲۴\ A$$

۱۹ ـ مدار شکل م ـ ۱۹ را در نظر بگیرید. با فرض $I_{s_۱} = I_{s_۲} = ۱۵nA$ و $I_{s_۴} = ۲I_{s_۳} = ۴۰\ nA$، ولتاژها و جریان‌های دیودها را به دست آورید.

☑ **راه حل:**



شکل م-۱۹

با توجه به فرض مسئله $I_{s_۴} = ۲I_{s_۳}$ با برابر بودن ولتاژها داریم:

$$I_۱ = I_۲ = ۱۵nA \leftarrow I_{s_۱} = I_{s_۲}$$

$$I_۴ = ۲I_۳$$

$$KCL: \begin{cases} I_۱ + I_۲ = I_۳ + I_۴ = ۱۵ + ۱۵ = ۳۰\ nA \\ ۲I_۳ = I_۴ \end{cases} \Rightarrow I_۳ + ۲I_۳ = ۳۰\ nA \to I_۳ = ۱۰\ nA$$

$$\to I_۴ = ۲I_۳ = ۲\times ۱۰\ nA = ۲۰\ nA$$

$$\to \begin{cases} I_۱ = I_۲ = ۱۵nA \\ I_۳ = ۱۰\ nA \\ I_۴ = ۲۰\ nA \end{cases}$$

برای به دست آوردن ولتاژها:

دیودهای $D_۱$ و $D_۲$ موازی هستند پس ولتاژها برابر دارند و همچنین دیودهای $D_۳$ و $D_۴$ موازی هستند پس آنها نیز ولتاژ برابر دارند.

$$I_{D_۴} = I_{s_۴}(e^{\frac{V'_۴}{۵۲}} - ۱) \to I_{D_۴} = -۲۰ = ۴۰(e^{\frac{V'_۴}{۵۲}} - ۱) \to$$

$$V'_۴ = ۳۶\,mV \to V_۳ = V_۴ = -۳۶\ mv$$

$$V_۱ = V_۲ = ۲۰^V + ۰/۰۳۶^V = ۲۰/۰۳۶^V$$

۲۰ ـ در دیود ژرمانیم پدیده شکست زنر در $E_۲ = ۲\times ۱۰^۷$ ولت بر متر اتفاق می‌افتد. نشان دهید $V_z = ۵۰/۹۳\,\rho_p$ است، که در آن ρ_p مقاومت ویژه بلور ژرمانیم نوع P می‌باشد. فرض کنید $N_A \ll N_D$ است.

☑ **راه حل:**

با توجه به صورت مسأله ۲۲ داریم:

$$V_z = \frac{\varepsilon E_z^۲}{۲qN_D}$$

و همچنین رابطه مقابل را داریم:

$$\delta_p = q\mu_p N_D$$

$$\to qN_D = \frac{\delta p}{\mu_p} \qquad \delta_p = \frac{۱}{\rho_p}$$

پس با توجه به روابط فوق داریم:

$\mu_p = ۱۸۰۰$ ژرمانیم

$\varepsilon_r = ۱۶$ برای دیود ژرمانیم

$$V_z = \frac{\varepsilon_۰ \varepsilon_r E_z^۲}{۲qN_D} \to V_z = \frac{۱۶\times ۸/۸۵\times ۱۰^{-۱۲}\times (۲\times ۱۰^۷\times ۱۰^{-۲})^۲\times ۱۸۰۰\,\rho_p}{۲}$$

$$\to V_z = ۵۰/۹۷۶\,\rho_p$$

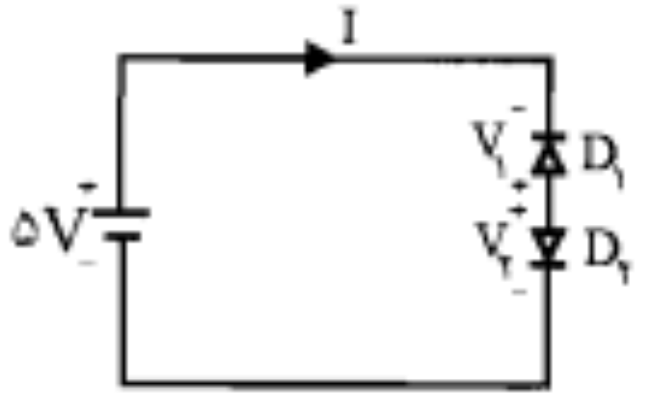
چون با توجه به جدول صفحه (۱۶) ρ_p بر حسب (Ω-cm) است ε_z را بر حسب ولت بر سانتیمتر می‌نویسیم.

۲۱ ـ در مدار شکل م ـ ۲۱ دیودها مشابه و از جنس ژرمانیم با ولتاژ شکست بیشتر از ۵ ولت هستند.

الف) ولتاژ دو سر هر دیوار را در دمای معمولی به دست آورید.

ب) چنانچه ولتاژ شکست دیودها برابر ۴/۹ ولت و جریان اشباع معکوس $۵\mu A$ باشد، جریان مدار را به دست آورید.

ج) با فرض ولتاژ شکست ۲ ولتاژ، جریان اشباع معکوس $۵\mu A$ و اضافه کردن مقاومت ۱۰۰ هم به صورت سری در مدار، جریان مدار را به دست آورید.



شکل م-۲۱

☑ **راه حل:**

الف)

$$I_۲ = I_s \to I_s = I_s(e^{\frac{V_۲}{۵۲}} - ۱) \to e^{\frac{V_۲}{۵۲}} = ۲ \to V_۲ = ۵۲\times Ln\,۲ = ۳۶\,mV$$

$$V_۱ = V_۲ - ۵^V = ۳۶\times ۱۰^{-۳} - ۵ = -۴/۹۶۴\,V$$

ب)

$$I = I_s(e^{\frac{V_۲}{۵۲}} - ۱) = ۵\mu A\,(e^{\frac{(۵^V - ۴/۹^V)\times ۱۰^{-۳}}{۵۲}} - ۱) = ۲۹/۲\,\mu A$$

$$V_۱ = ۲^V$$

ج)

$$(۱)\quad ۳^V = V_D + ۰/۱۱ I_D \quad , \quad I_D = ۵\times ۱۰^{-۳}(e^{\frac{V_D}{۵۲}} - ۱) \quad (۲)$$

از رابطه (۱) $V_D = (۳ - ۰/۱۱ I_D)\times ۱۰^{-۳}\,mV$ (a)

حال رابطه (a) را در رابطه (۲) قرار می‌دهیم پس داریم: $I_D = ۲۵/۵۵۹\,mA$

۲۲ ـ ثابت کنید که در یک دیود زنر که در آن $N_A \gg N_D$ است، ولتاژ زنر ($V_۲$) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_۲ = \frac{\varepsilon E_z^۲}{۲q N_D}$$

که در آن E_z میدان لازم برای شکست زنر است.

📖 **راهنمایی: از رابطه $V_۰$ برحسب W و نیز روابط $E_۰$ استفاده کنید.**

☑ **راه حل:** در فصل اول روابط زیر را داشتیم:

رابطه (۱ ـ ۲۳) صفحه ۲۲

$$E_۰ = \frac{-qN_D x_N}{\varepsilon} \to x_N^۲ = \frac{\varepsilon^۲ E_۰^۲}{q^۲ N_D^۲} \qquad (۱)$$

رابطه (۱ - ۲۸) صفحه ۲۲

$$x_N = \left[\frac{۲\varepsilon_۰ V_۰}{qND(۱ + \frac{N_D}{N_A})}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

فرض مسئله $N_A \gg N_D \to \frac{N_D}{N_A} = ۰$

$$\to x_N = (\frac{۲\varepsilon_۰ V_۰}{qN_D})^{\frac{۱}{۲}} \to x_N^۲\ \frac{۲\varepsilon V_۰}{qN_D} \qquad (۲)$$

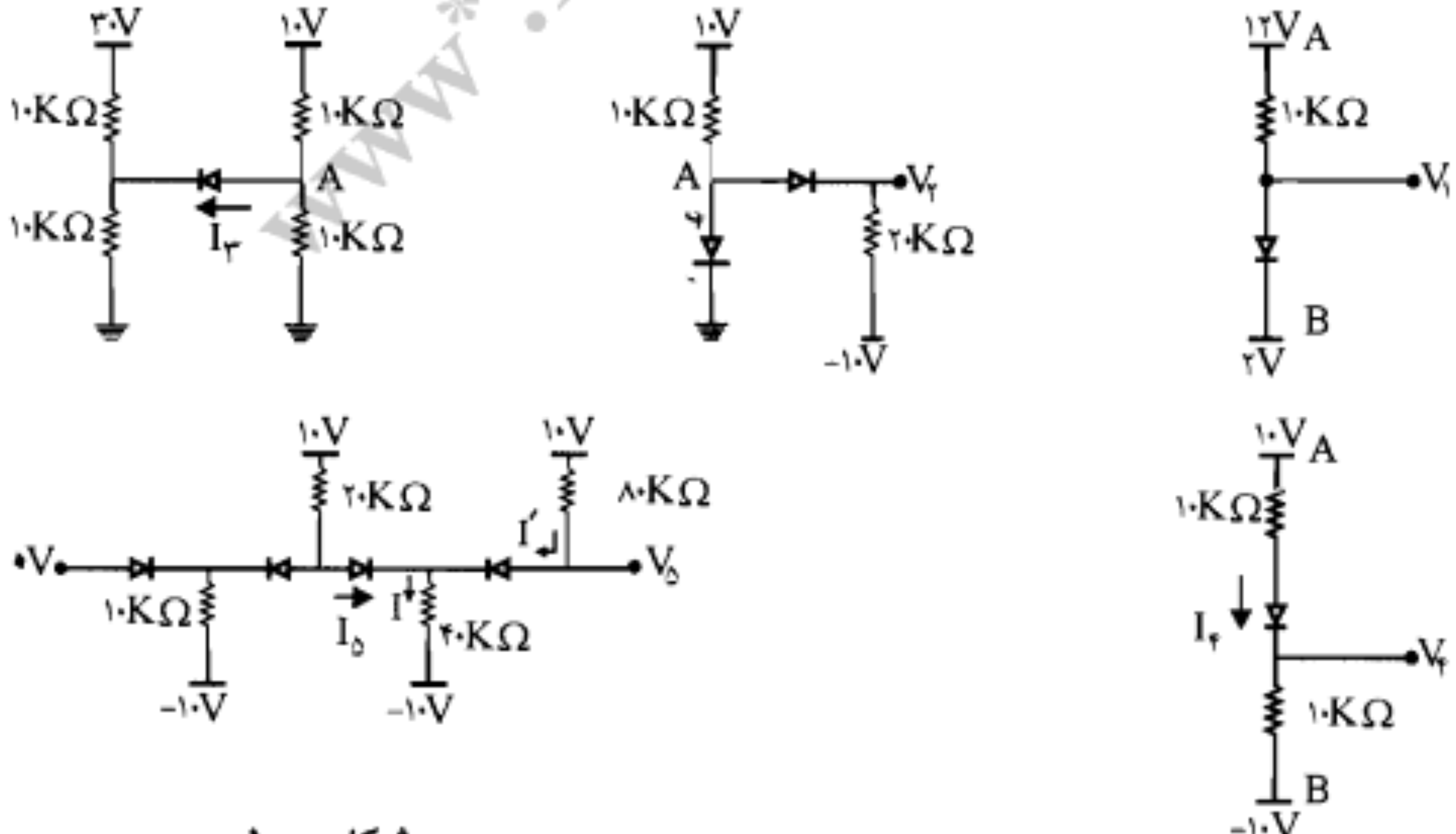
$$\to \begin{cases} x_N^۲ = \frac{\varepsilon^۲ E_۰^۲}{q^۲ N_D^۲} & (۱) \\ x_N^۲ = \frac{۲\varepsilon V_۰}{qN_D} & (۲) \end{cases} \to \frac{\varepsilon^۲ E_۰^۲}{q^۲ N_D^۲} = \frac{۲\varepsilon V_۰}{qN_D}$$

$$\frac{\varepsilon E_۰^۲}{qN_D} = ۲V_۰ \to V_۰ = \frac{\varepsilon E_۰^۲}{۲qN_D}$$

www.PnuEB.com

فصل ۳
مدارهای دیودی

۱ ـ در مدارهای دیودی شکل م ـ ۱ ولتاژها و جریان‌های نشان داده شده را محاسبه کنید. دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.



شکل م ـ ۱

☑ راه حل:

در شکل (۱) چون $V_A > V_B$ است پس دیود روشن بوده و هدایت می‌کند پس داریم: $V_1 = V = 2V$

در شکل (۲) چون $V_A > 0$ است پس دیود روشن بوده و $V_A = 0^V$ می‌باشد. و چون $V_A > -10^V$ است پس دیود (۲) نیز روشن بوده و ولتاژ آن هم صفر ولت می‌باشد $V_A = V_2 = 0^V$

در شکل (۳): چون $V_B > V_A$ می‌باشد پس دیود قطع است و هیچ جریانی از آن نمی‌گذرد پس $I_3 = 0$ می‌باشد.

در شکل (۴): چون $V_A > V_4$ می‌باشد پس دیود روشن بوده و هدایت می‌کند پس جریان آن از KVL به‌دست می‌آید.

$$-10^V + 10 I_4 + 10 I_4 - 10 = 0 \rightarrow 20^{K\Omega} I_4 = 20^V \rightarrow I_4 = 1\ mA$$

$$V_4 = 10 I_4 - 10 = 10(1) - 10 = 0^V$$

در شکل (۵): هر چهار دیود هدایت می‌کنند پس داریم:

$$V_5 = 0^V$$

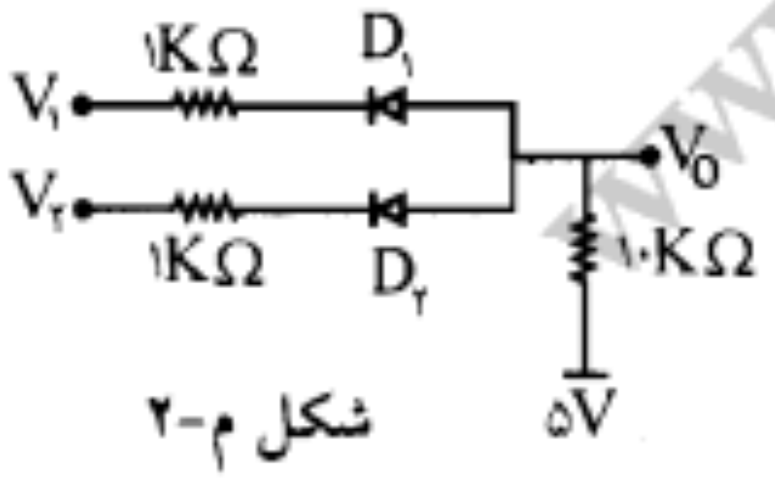
$$I_5 = I - I' \qquad \begin{cases} I = \frac{10}{40}\ mA \\ I' = \frac{10}{80}\ mA \end{cases} \rightarrow I_5 = \frac{10}{40} - \frac{10}{80} = \frac{10}{80} = \frac{1}{8} = 0/125\ mA$$

۲ ـ در مدار شکل م ـ ۲ دیودها ایده‌آل هستند. مطلوب است ولتاژ خروجی V_0 برای حالت‌های زیر:

الف) $V_1 = V_2 = 5V$

ب) $V_1 = 5^V$ و $V_2 = 0^V$

ج) $V_1 = V_2 = 0^V$



شکل م-۲

☑ راه حل:

الف) با فرض اینکه هر دو دیود در حالت وصل قرار دارند داریم:

$$KCL: \frac{V_0 - 5}{10\,K\Omega} = \frac{V_0 - V_1}{1\,K\Omega} + \frac{V_0 - V_2}{1\,K\Omega} \rightarrow$$

$$\frac{V_0 - 5}{10\,K\Omega} = \frac{V_0 - 5V}{1\,K\Omega} + \frac{V_0 - 5}{1\,K\Omega} = 2V_0 - 10^V \rightarrow V_0 - 5^V = 20 V_0 - 100^V$$

$$\rightarrow 190 V_0 = 95^V \rightarrow V_0 = \frac{95}{19} = 5V$$

www.PnuEB.com

ب) با فرض اینکه $D_۱$ خاموش و $D_۲$ روشن باشد داریم:

$$V_۰ = ۵\times\frac{۱}{۱۰+۱} = \frac{۵}{۱۱} = ۰/۴۵^V$$

که با این ولتاژ قطع بودن $D_۱$ محقق است. چون ولتاژ آند از کاتد کوچکتر می‌باشد و وصل بودن $D_۲$ نیز محقق است چون $I_{D_۲} = \frac{۵-۰}{۱۱} = \frac{۵}{۱۱} > ۰$

ج) با فرض وصل بودن هر دو داریم:

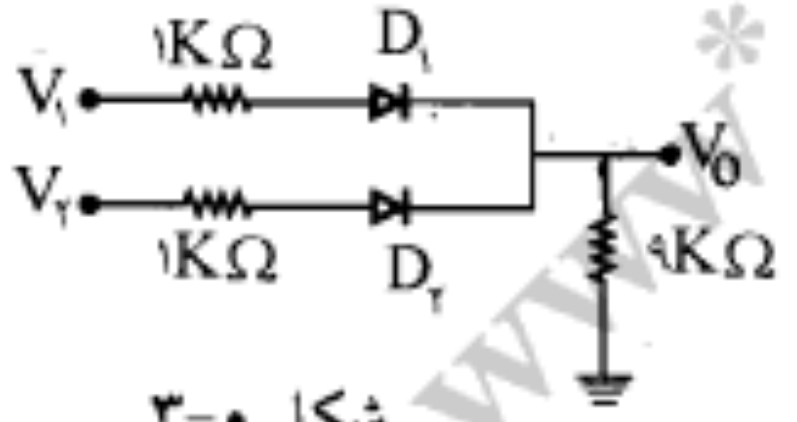
$$\frac{V_۰-۵}{۱۰}+\frac{V_۰-۰}{۱}+\frac{V_۰-۰}{۱} = ۰ \Rightarrow V_۰ = \frac{۵}{۱۹}$$

با این ولتاژ به دست آمده وصل بودن هر دو دیود ثابت می‌شود.

۳ـ در مدار شکل م ـ ۳، برای دیودها $V_D\ (ON) = ۰/۷V$ است. ولتاژ خروجی را به ازای ولتاژهای ورودی داده شده به‌دست آورید و وضعیت قطع یا وصل هر یک از دیودها را مشخص کنید.

الف) $V_۱ = ۱۰^V \quad , \quad V_۲ = ۰^V$ **ج)** $V_۱ = ۱۰^V \quad , \quad V_۲ = ۵^V$

ب) $V_۱ = ۵^V \quad , \quad V_۲ = ۰^V$ **د)** $V_۱ = ۵^V \quad , \quad V_۲ = ۵^V$



شکل م-۳

☑ راه حل:

الف) در این حالت $D_۱$ به صورت مستقیم بایاس شده و دیود $D_۲$ به صورت معکوس بایاس شده پس داریم: دیود $D_۱$ روشن و دیود $D_۲$ قطع خواهد بود:

$$\frac{V_۰}{۹K\Omega} = \frac{۱۰-V_۰-۰/۷}{۱K\Omega} \to V_۰ = ۹۰ - ۹V_۰ - ۶/۳$$

$$۱۰V_D = ۸۳/۷V \to V_۰ = ۸/۳۷\ V$$

ب) در این حالت نیز $D_۱$ روشن و $D_۲$ خاموش می‌باشد پس داریم:

$$\frac{V_۰}{۹K\Omega} = \frac{۵-V_۰-۰/۷}{۱K\Omega} \to V_۰ = ۴۵ - ۹V_۰ - ۶/۳$$

$$\to ۱۰V_۰ = ۳۸/۷\ V \to V_۰ = ۳/۸۷\ V$$

ج) در این حالت هر د دیود روشن می‌باشند:

$$\frac{V_۱-۰/۷}{۱K\Omega}+\frac{V_۲-۰/۷}{۱K\Omega} = V_۰\left(\frac{۱}{۹}+\frac{۱}{۱}+\frac{۱}{۱}\right)$$

$$\to V_۰(۱+۹+۹) = ۹(V_۱-۰/۷)+۹(V_۲-۰/۷) \to V_۰ = \frac{۹(۱۰-۰/۷)+۹(۵-۰/۷)}{۱۹}$$

$$\to V_۰ = ۶/۴۴$$

با این $V_۰$ به دست آمده مشخص می‌شود که $D_۲$ خاموش می‌باشد و $D_۱$ روشن می‌باشد پس داریم

$$V_۰ = (V_۱ - ۰/۷)\times\frac{۹}{۹+۱} = ۸/۳۷^V$$

د) با فرض وصل بودن هر دو دیود داریم:

$$KCL: \frac{V_۱-V_۰-۰/۷}{۱}+\frac{V_۲-V_۰-۰/۷}{۱} = \frac{V_۰}{۹}$$

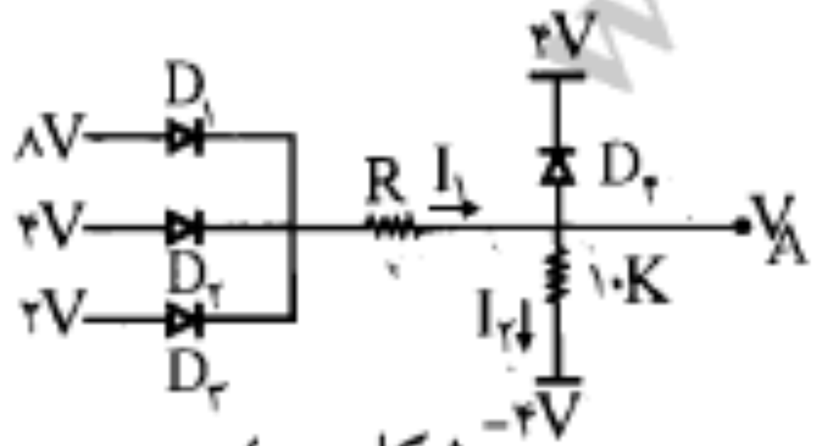
$$۵-V_۰-۰/۷+۵-V_۰ = \frac{V_۰}{۹} \to ۸/۶-۲V_۰ = \frac{V_۰}{۹} \to V_۰ = ۴/۰۷V$$

با این ولتاژ به دست آمده مشخص می‌شود که هر دو دیود روشن می‌باشد پس فرض ما درست است.

۴ـ در مدار شکل م ـ ۴ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

الف) مقاومت R را طوری تعیین کنید که V_A برابر ۲V شود. در این صورت $I_۱$ و $I_۲$ چقدر خواهد بود؟

ب) به ازای $R = ۲K\Omega$ مقادیر V_A، $I_۱$ و $I_۲$ را تعیین کنید.



شکل م-۴

☑ راه حل:

الف) $D_۴$ قطع می‌باشد و دیودهای دیگر هدایت می‌کنند. $V_A = ۲V \to$

$$KCL: \frac{۸-V_A}{R}+\frac{۴-V_A}{R}+\frac{۲-V_A}{R} = \frac{V_A+۴}{۱۰}$$ از طرفی $V_A = ۲V$

$$\frac{۶}{R}+\frac{۲}{R}+۰ = \frac{۶}{۱۰} = ۰/۶ \to \frac{۸}{R} = ۰/۶ \to R = \frac{۸۰}{۶} = \frac{۴۰}{۳} = ۱۳/۳۳\ K\Omega$$

و چون داریم دیود $D_۴$ قطع می‌باشد پس $I_۱$ و $I_۲$ برابرند پس داریم:

$$I_۱ = I_۲ = \frac{V_A + ۴}{۱۰} = \frac{\frac{۴۰}{۳} + ۴}{۱۰} = ۱/۷۴ \text{ mA}$$

ب) چون نمی‌دانیم مقدار V_A چند است پس ابتدا فرض می‌کنیم $D_۴$ قطع است پس داریم:

$$KCL: \frac{۸ - V_A}{۲} + \frac{۴ - V_A}{۲} + \frac{۲ - V_A}{۲} = \frac{V_A + ۴}{۱۰} \rightarrow \frac{۱۴ - ۳V_A}{۲} = \frac{V_A + ۴}{۱۰}$$

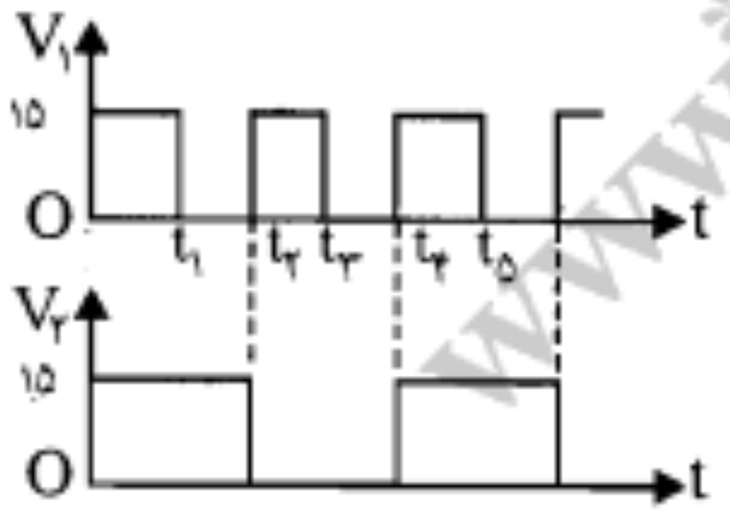
$$۱۴۰ - ۳۰ V_A = ۲ V_A + ۸ \rightarrow ۳۲ V_A = ۱۳۲ \rightarrow V_A = ۴/۱۲۵ V$$

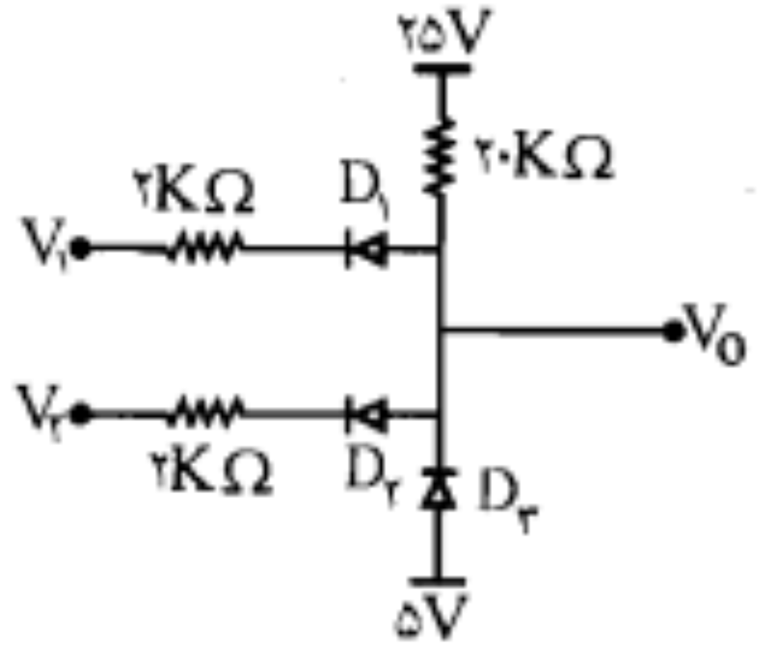
پس فرض قطع بودن $D_۴$ اشتباه است پس مسأله را با فرض روشن بودن $D_۴$ حل می‌کنیم در این حالت V_A برابر ۴V می‌باشد.

پس $I_۲ = \frac{۴ + ۴}{۱۰} = ۰/۸ \text{ mA}$

پس $I_۱ = \frac{۸ - V_A}{R} + \frac{۴ - V_A}{R} + \frac{۲ - V_R}{R} = \frac{۸ - ۴}{۲} + \frac{۴ - ۴}{۲} + \frac{۲ - ۴}{۲} = ۲ + ۰ - ۱ = ۱ \text{mA}$

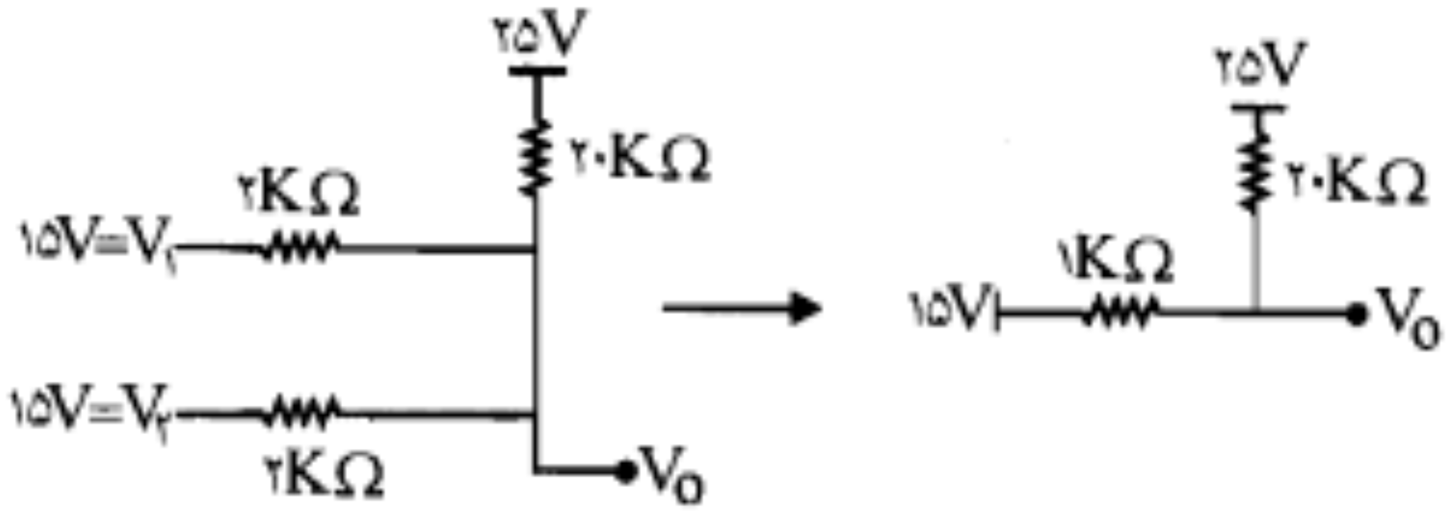
۵ـ در مدار شکل م ـ ۵ دیودها ایده‌آل هستند. با توجه به شکل موج ولتاژهای $V_۱$ و $V_۲$، شکل موج ولتاژ خروجی را رسم کنید.





شکل م-۵

در زمان $۰ < t < t_۱$ داریم دیود $D_۳$ قطع و دیودهای $D_۱$ و $D_۲$ روشن هستند پس مدار معادل به صورت زیر خواهد بود: (دیودها ایده‌آل)



$$V_۰ = ۱۵ + \frac{(۲۵ - ۱۵)}{۲۰ + ۱} = ۱۵/۴۸ V$$

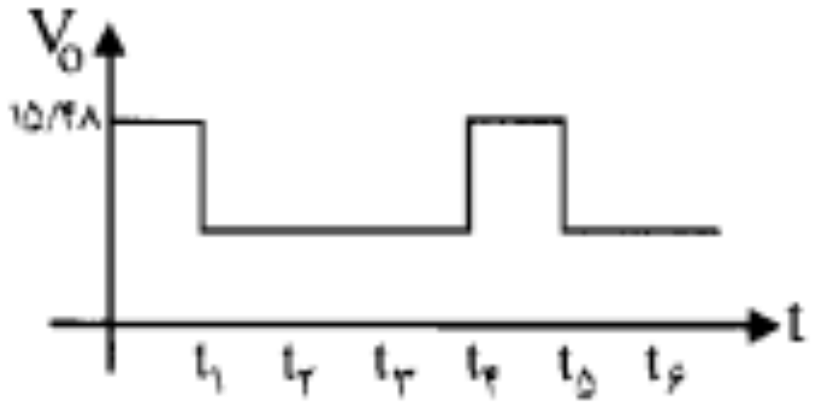
در زمان $t_۱ < t < t_۲$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_۰ = ۵V$

در زمان $t_۲ < t < t_۳$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_۰ = ۵V$

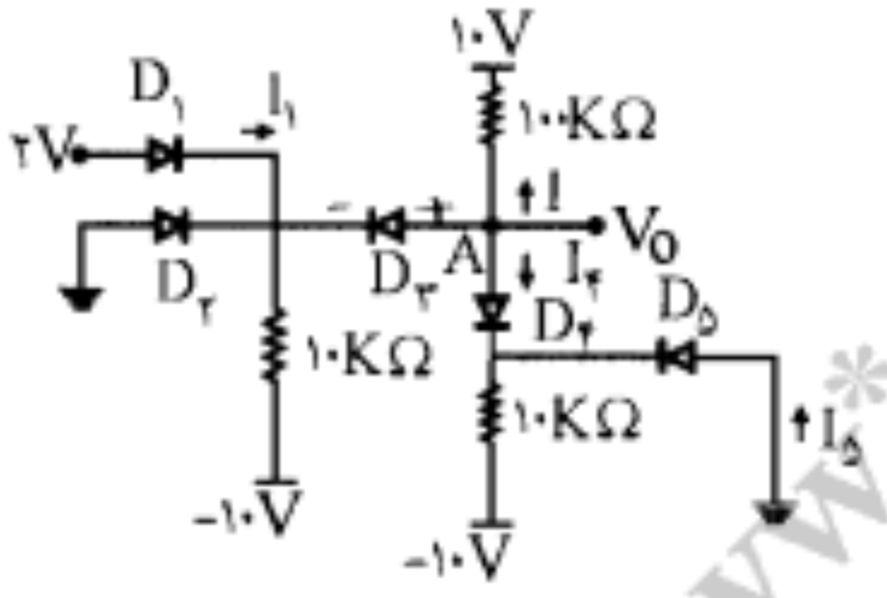
در زمان $t_۳ < t < t_۴$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_۰ = ۵V$

در زمان $t_۴ < t < t_۵$: باز دیود $D_۳$ قطع و دیود $D_۱$ و $D_۲$ روشن هستند و همانند حالت اول می‌باشد پس $V_۰ = ۱۵/۴۸ r$

پس مدار معادل $V_۰$ به صورت زیر خواهد بود:



۶ـ در مدار شکل م ـ ۶، با فرض ایده‌آل بودن همه دیودها، ولتاژ $V_۰$ و جریان‌های $I_۱$ و $I_۵$ را تعیین کنید.



شکل م-۶

☑ راه حل:

با توجه به مدار داریم:

$D_۱$: ON $D_۲$: OFF $D_۳$: OFF $D_۴$: ON $D_۵$: ON

$$I_۱ = \frac{۲V - (-۱۰^V)}{۱۰ K\Omega} = ۱/۲ mA$$

و چون $D_۴$ و $D_۵$ روشن می‌باشند پس $V_۰ = ۰^V$ می‌باشد.

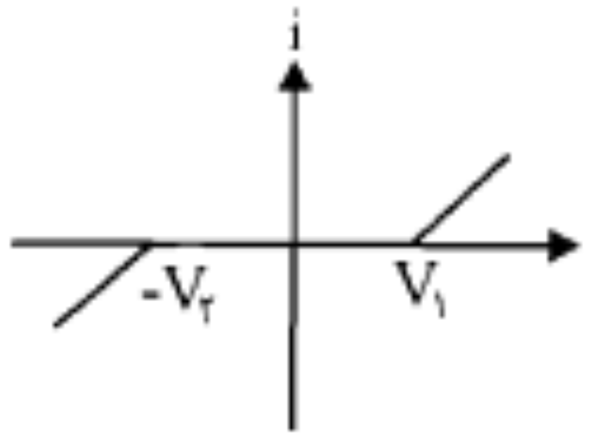
در نقطه A $KCL: \frac{V_۰ - ۱۰^V}{۱۰۰ K\Omega} - I_۵ + \frac{V_۰ - (-۱۰^V)}{۱۰ K\Omega} = ۰$

$$V_۰ = ۰^V \rightarrow \frac{-۱۰}{۱۰۰} - I_۵ + \frac{۱۰}{۱۰} = ۰ \rightarrow I_۵ = ۱ - ۰/۱ = ۰/۹ \text{ mA}$$

۷ ـ منحنی مشخصه ولتاژ ـ جریان در شکل م ـ ۷ را در نظر بگیرید:

الف) با استفاده از دیودهای ایده‌آل، منابع و مقاومت مداری طراحی کنید که دارای مشخصه مزبور باشد.

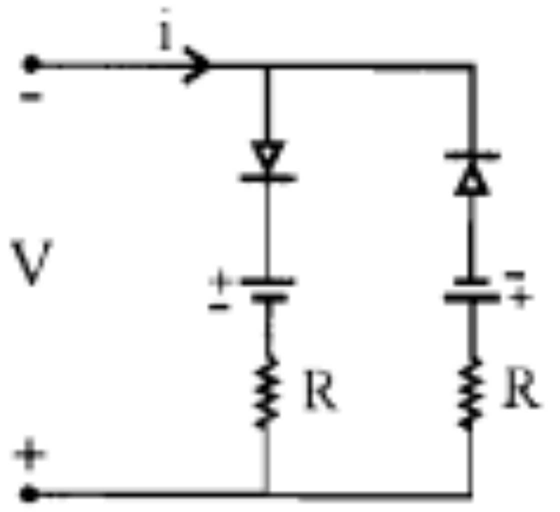
ب) طرح خود را به نحوی اصلاح کنید که دو شیب موجود در مشخص متفاوت باشند.



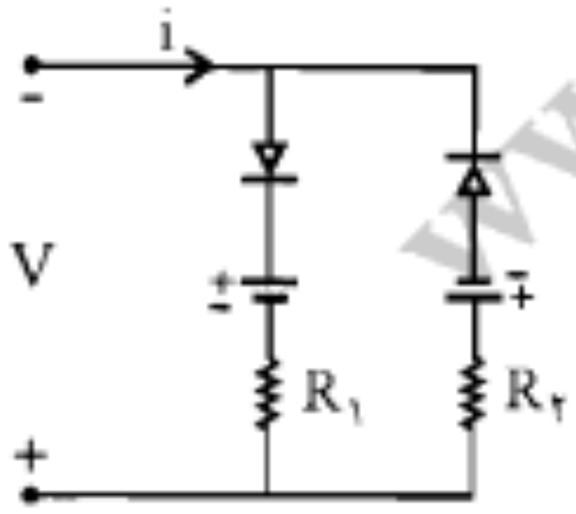
شکل م-۷

☑ **راه حل:**

الف) با فرض اینکه دو شیب برابر باشند.

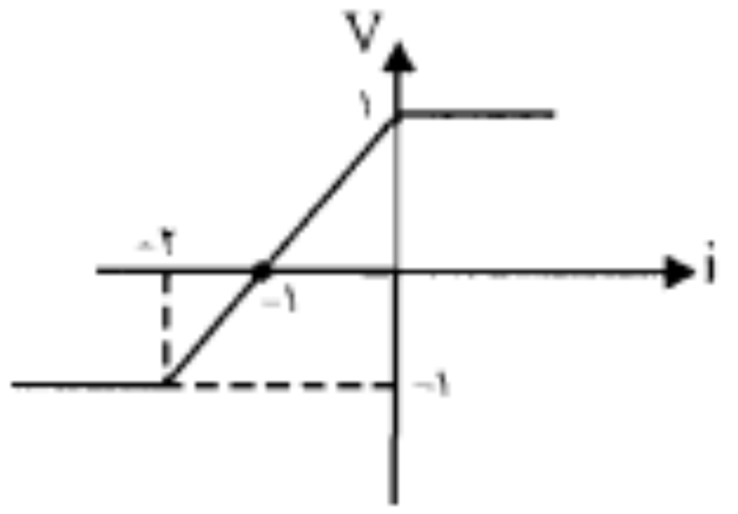


ب) با فرض اینکه دو شیب برابر نباشند مدار همان مقدار قبلی می‌باشد ولی باید R ها متفاوت باشند یعنی $R_1 \neq R_2$



$R_1 \neq R_2$

۸ ـ با استفاده از کمترین تعداد مقاومت، منبع ولتاژ و دیود ایده‌آل مداری با مشخصه جریان ـ ولتاژ مطابق شکل م ـ ۸ طراحی کنید.



شکل م-۸

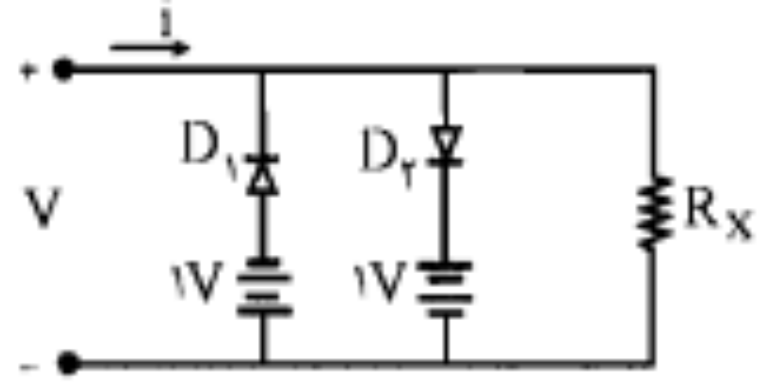
☑ **راه حل:**

با توجه به شکل م ـ ۸ داریم:

V مقدار ثابت می‌باشد: $i > 0 \rightarrow V = 1^V$

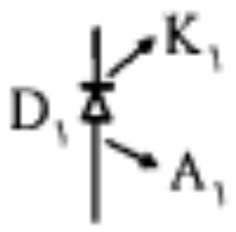
V مقدار ثابت می‌باشد: $i > -2 \rightarrow V = -1^V$

بنابراین مدار باید دارای چنین فرمی باشد:



در این مدار داریم:

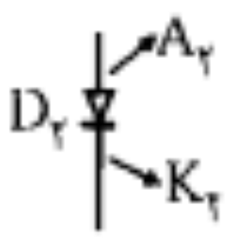
اگر D_1 و D_2 هر دو خاموش باشند: $V = R_X \times i$ و شرط خاموش بودن D_1 به صورت زیر می‌باشد:



D_1 شرط خاموش بودن : $V_{A_1} < V_{K_1}$ ؛ داریم و $V_{A_1} = -1^V$ و $V_{K_1} = R_X\, i$

$V_{A_1} < V_{K_1} \Rightarrow -1^V < R_X\, x_i \rightarrow i > \frac{-1}{R_X}$

شرط خاموش بودن D_2 :



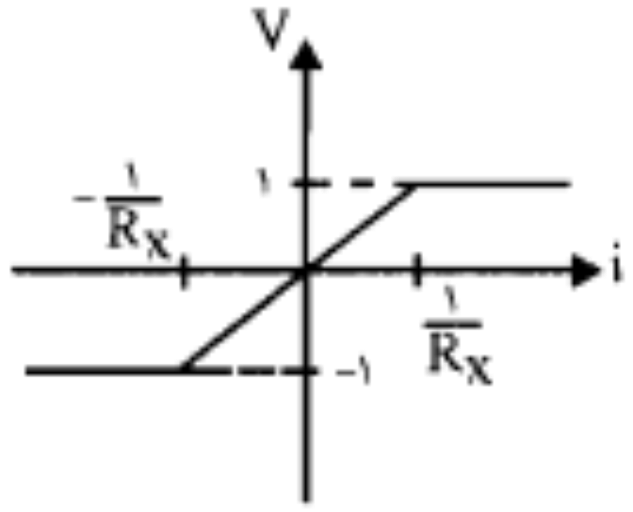
$V_{A_2} < V_{K_2}$

از طرفی داریم: $V_{A_2} = R_X\, i \quad , \quad V_{K_2} = 1^V$

$V_{A_2} < V_{K_2} \Rightarrow R_X\, i < 1^V \rightarrow i < \frac{1}{R_X}$

یعنی در $-\frac{1}{R_X} < i < \frac{1}{R_X}$ هر دو دیود خاموش می‌باشند و به ازای $i < -\frac{1}{R_X}$ دیود D_1 روشن می‌شود و دیود D_2 همچنان خاموش می‌ماند و در این حالت $V = -1^V$ می‌باشد.

به ازای $i > \frac{1}{R_X}$، دیود D_2 روشن می‌شود و دیود D_1 همچنان خاموش می‌ماند و در این حالت $V = 1^V$ می‌باشد.

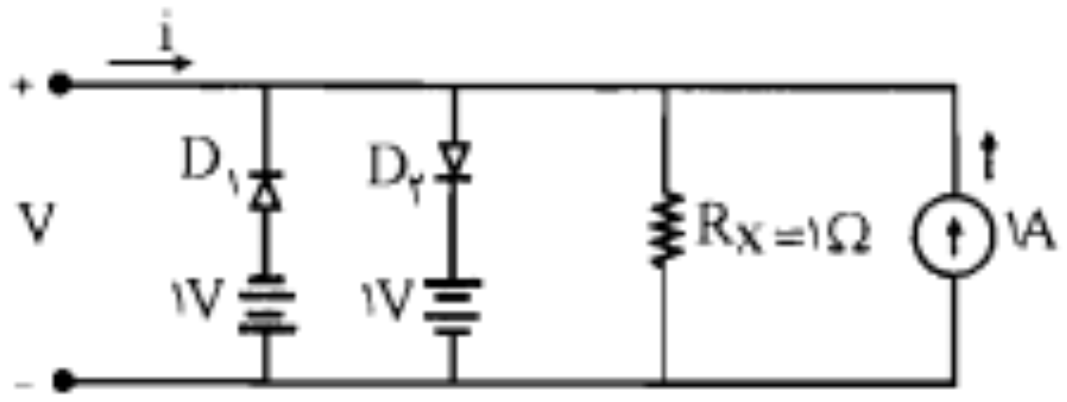


$$\begin{cases} -\frac{1}{R_X} < i < \frac{1}{R_X} \Rightarrow V = R_X \times i \\ \frac{1}{R_X} < i \Rightarrow V = 1^V \\ i < -\frac{1}{R_X} \Rightarrow V = -1^V \end{cases}$$

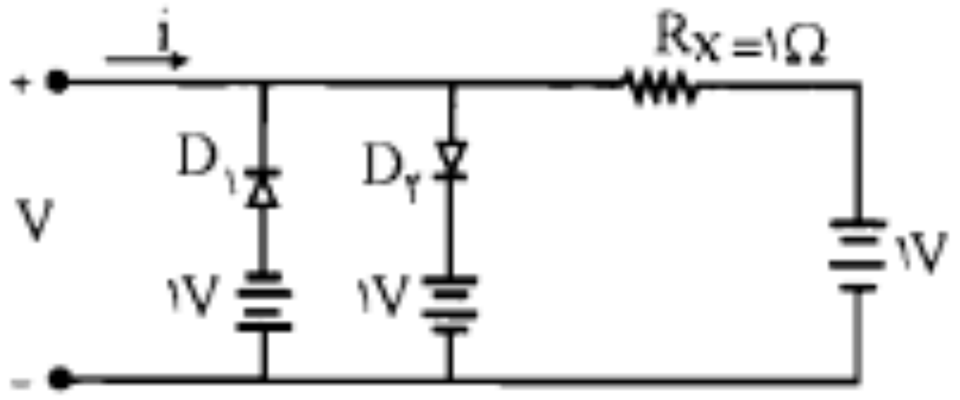
اگر این مشخصه رسم شده را با مشخصه داده شده مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که باید در مشخصه داده

www.*PnuEB*.com

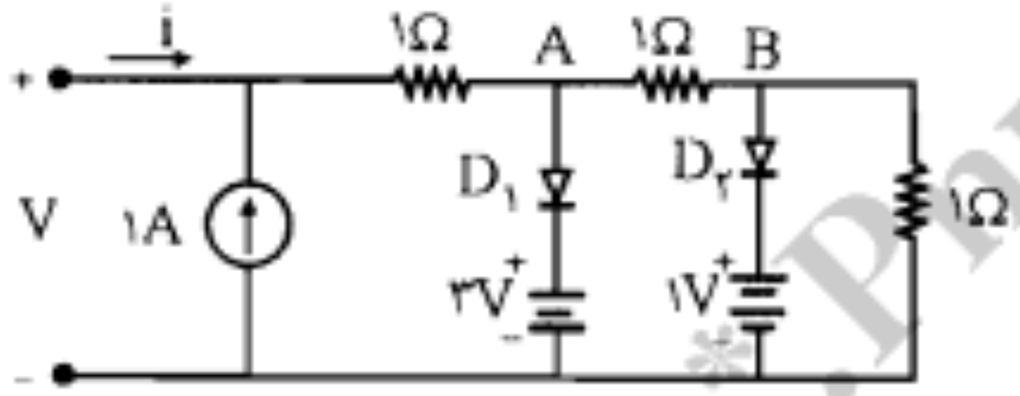
شده تغییر محور دهیم یعنی i را به i-۱ تبدیل کنیم یعنی کافی است که $1=\frac{1}{R_X}$ انتخاب شود یعنی $R_X=1\Omega$ خواهد شد و یک تغییر i به i-۱ نیز انجام گیرد یعنی یک منبع جریان یک آمپر در گره ورودی اضافه شود سپس مدار به صورت فرم زیر می‌باشد:



تبدیل منبع :



۹ ـ در مدار شکل م ـ ۹ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه i بر حسب V را در این مدار به دست آورده و رسم کنید.



شکل م ـ ۹

☑ **راه حل:**

فرض می‌کنیم هر دو دیود روشن باشند پس داریم: $D_1,D_2: ON \Rightarrow VA=3^V \qquad VB=1^V$

$$ID_2=\frac{VA-VB}{1\Omega}-\frac{VB}{1\Omega}=\frac{3-1}{1}-\frac{1}{1}=1A$$

$$ID_1=\frac{V-VA}{1\Omega}-\frac{VA-VB}{1\Omega}=\frac{V-3}{1}-\frac{3-1}{1}=V-5>0 \rightarrow V>5$$

با شرط $V>5$ هر دو دیود روشن می‌باشند و داریم:

$$KVL: V=(i+1)\times 1^{\Omega}+3^V=i+4$$

پس: $V>5 \Rightarrow \begin{cases}D_1:ON\\ D_2:ON\end{cases}, \quad V=i+4$

(I) برای اینکه دیود D_2 خاموش شود باید رابطه زیر را داشته باشیم:

با استفاده از تقسیم ولتاژ داریم $V_B<1^V \Rightarrow V\times\frac{1}{3}<1^V \rightarrow V<3^V$

(II) برای اینکه دیود D_1 خاموش باشد باید رابطه زیر را داشته باشیم:

$$VA<3^V \Rightarrow V\times\frac{2}{3}<3^V \Rightarrow V<4.5^V$$

که قسمت مشترک دو شرط (I) و (II)، $V<3$ می‌باشد پس داریم:

$$V<3^V \Rightarrow \begin{cases}D_1:Off\\ D_2:Off\end{cases}, \quad V=3i+3$$

اگر D_1 خاموش و D_2 روشن باشد داریم:

$$V_A=(V-1)\times\frac{1}{2}+1 \quad , \quad V_B=1^V$$

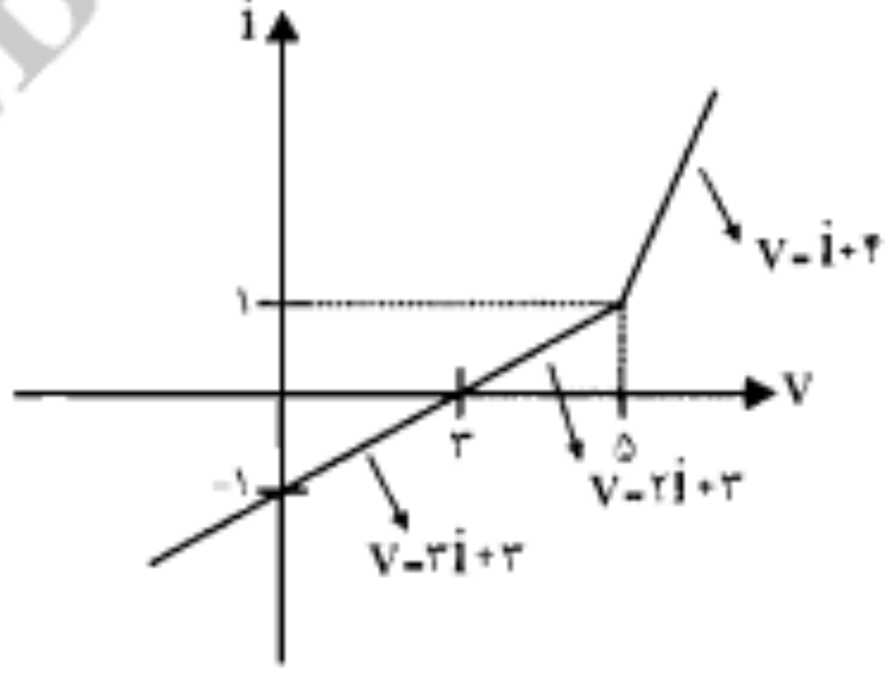
شرط روشن بودن D_2: $ID_2=\frac{V-1}{2}-1=\frac{V-3}{2}>0 \rightarrow V>3$

شرط خاموش بودن D_1: $V_A<3 \Rightarrow V\times\frac{1}{2}=\frac{1}{2}<3 \rightarrow V<5^V$

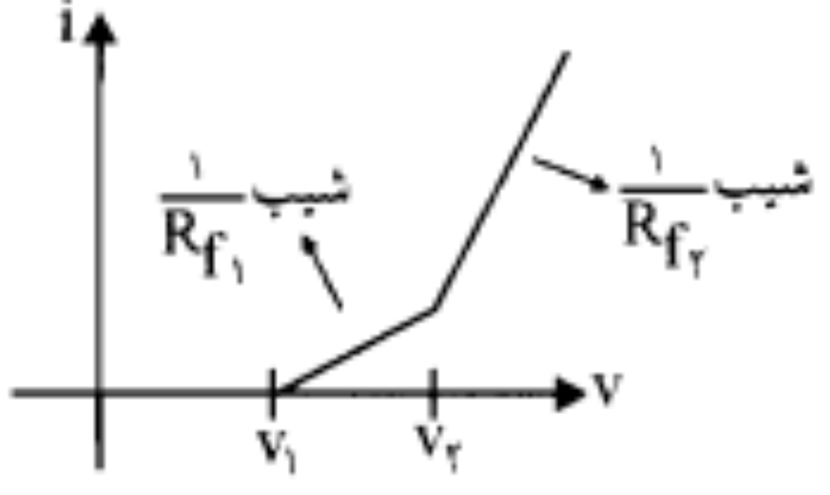
که قسمت مشترک $5>V>3$ می‌باشد برای اینکه D_1 خاموش و D_2 روشن باشد.

$$V=(i+1)\times 2+1$$
$$=2i+3$$

$$3<V<5 \Rightarrow \begin{cases}D_1:OFF\\ D_2:ON\end{cases}, \quad V=2i+3$$



۱۰ ـ منحنی مشخصه یک دیود را مطابق شکل م ـ ۱۰ مدل‌سازی کنید. مدار معادل این مدل را با استفاده از دیودهای ایده‌آل، مقاومت‌ها و منابع طرح کنید. مقادیر قطعه‌های به کار رفته در مدار را بر حسب پارامترهای مدل به دست آورید.



شکل م ـ ۱۰

☑ **راه حل:**

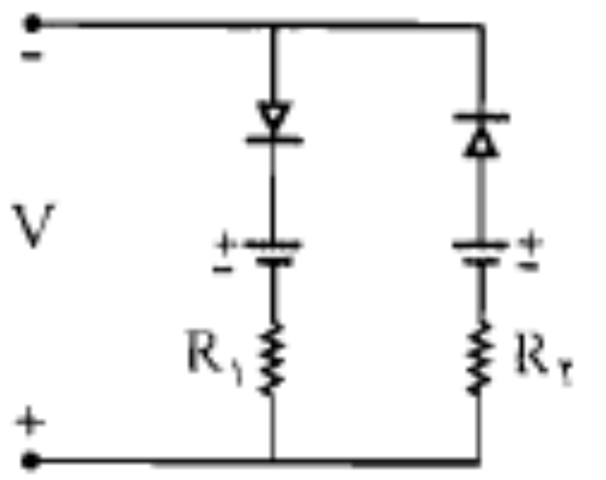
با توجه به شکل م ـ ۱۰ داریم:

$V\le V_1 \rightarrow$ هر دو دیود قطع

$V_1\le V\le V_2 \rightarrow$ D_1 وصل و D_2 قطع

$V\ge V_2 \rightarrow$ هر دو دیود روشن

www.PnuEB.com



$R_۱ = R_{f_۱}$

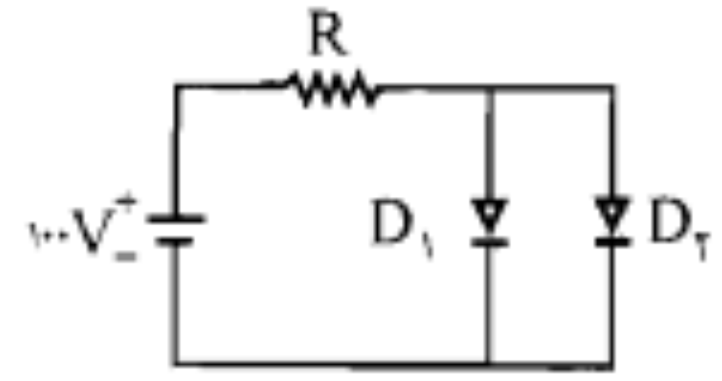
$R_۱ \| R_۲ = R_{f_۲} \rightarrow R_۲ = \frac{R_{f_۱} + R_{f_۲}}{R_{f_۱} - R_{f_۲}}$

۱۱ـ در مدار شکل م ـ ۱۱ دیودها دارای مدل خطی پاره‌ای به صورت زیر هستند:

$D_۱ = V\gamma_۱ = ۰/۲ \quad , \quad R_f = ۲۰\,\Omega$

$D_۲ = V\gamma_۲ = ۰/۶ \quad , \quad R_f = ۱۵\Omega$

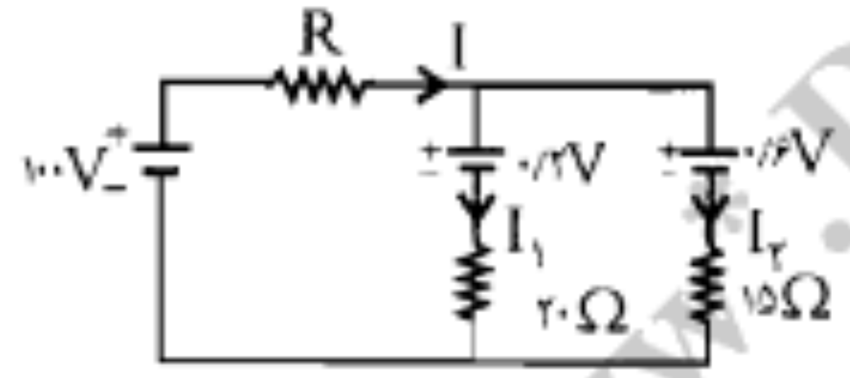
به ازای $R = ۱۰\,K\Omega$ و $R = ۱K\Omega$ جریان دیودها را به دست آورید.



شکل م-۱۱

☑ راه حل:

هر دو دیود به صورت مستقیم بایاس شده‌اند پس مدار معادل به صورت شکل زیر می‌باشد.



$$\begin{cases} VD_۱ = ۰/۲ + ۰/۰۲I_۱ \\ VD_۲ = ۰/۶ + ۰/۰۱۵I_۲ \end{cases}$$

از طرفی: $VD_۱ = VD_۲ \rightarrow ۰/۲ + ۰/۰۲I_۱ = ۰/۶ + ۰/۰۱۵\,I_۲$

$\rightarrow ۰/۰۲I_۱ = ۰/۴ + ۰/۰۱۵I_۲ \rightarrow I_۱ = ۲۰ + ۰/۷۵\,I_۲$

$KCL:\ I = I_۱ + I_۲ = I_۲ + ۲۰ + ۰/۷۵\,I_۲ = ۲۰ + ۱/۷۵\,I_۲$

$KVL:\ ۱۰۰ = RI + ۰/۶ + ۰/۰۱۵I_۲ = R\,(۲۰ + ۱/۷۵\,I_۲) + ۰/۶ + ۰/۰۱۵\,I_۲$

$R = ۱K\Omega \rightarrow ۱۰۰ = ۱K\Omega\,(۲۰ + ۱/۷۵\,I_۲) + ۰/۶ + ۰/۰۱۵\,I_۲$

$\rightarrow ۱۰۰ = ۲۰ + ۱/۷۵I_۲ + ۰/۶ + ۰/۰۱۵\,I_۲ \rightarrow ۷۹/۴ = ۱/۷۶۵I_۲$

$\rightarrow I_۲ = \frac{۷۹/۴}{۱/۷۶۵} = ۴۵\,mA \rightarrow I_۱ = ۲۰ + ۰/۷۵\,I_۲ = ۵۳/۷۵\,mA$

$R = ۱۰K\Omega \rightarrow ۱۰۰ = ۱۰\,(۲۰ + ۱/۷۵I_۲) + ۰/۶ + ۰/۰۱۵\,I_۲ \rightarrow$

$۱۰۰ = ۲۰۰/۶ + ۱۷/۵۲I_۲ \rightarrow I_۲ = -۵mA$

یعنی در این حالت دیود $D_۲$ هدایت نمی‌کند و اگر فرض کنیم دیود $D_۱$ هدایت می‌کند داریم:

$I = I_۱ = \frac{۱۰۰ - ۰/۲}{۱۰ + ۰/۰۲} = ۹/۹۶\,mA$

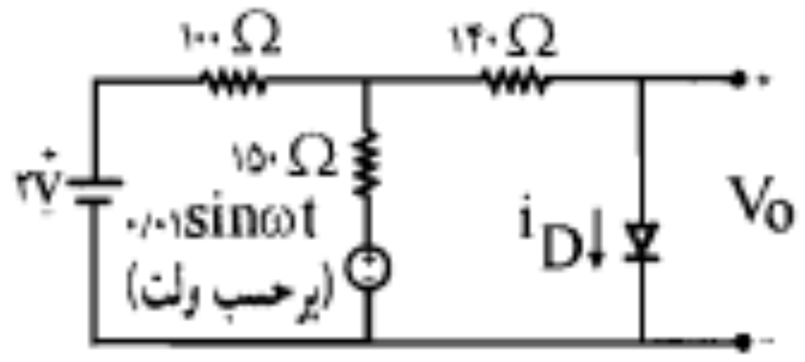
۱۲ـ در مدار شکل م ـ ۱۲ معادله ولتاژ ـ جریان دیود آن به صورت زیر است:

$$i_D = ۱۰^{-۶}\,(e^{\frac{V_D}{V_T}} - ۱)$$

(i_D بر حسب آمپر و V_D بر حسب ولت) مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) مدار معادل تونن دو سر دیود | **ب) جریان ثابت‌گذرنده از دیود**

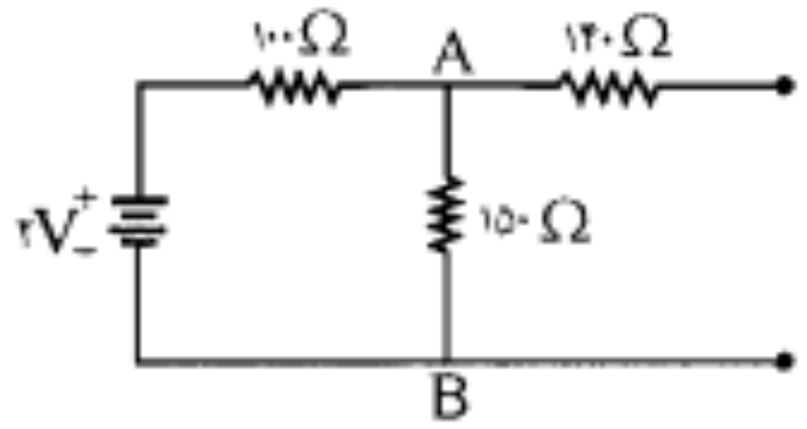
ج) مقاومت دینامیکی دیود (r_d) | **د) ولتاژ خروجی V_O**



شکل م-۱۲

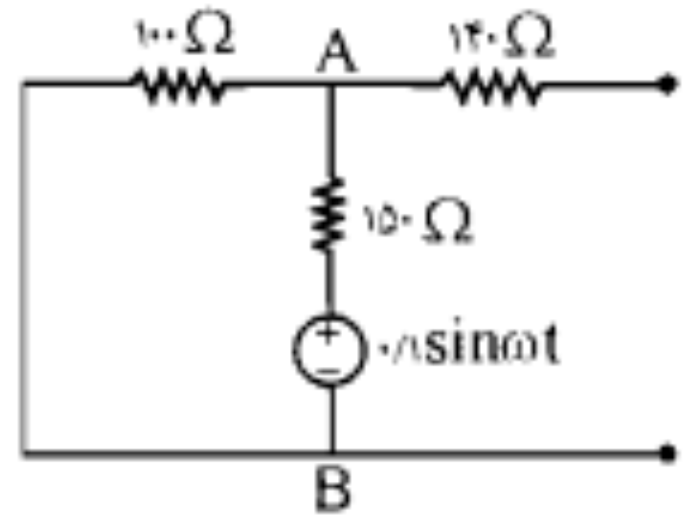
☑ راه حل:

الف) برای به دست آوردن مدار معادل تونن دو سر دیود در شکل dc باید منبع ac را از بین ببریم:



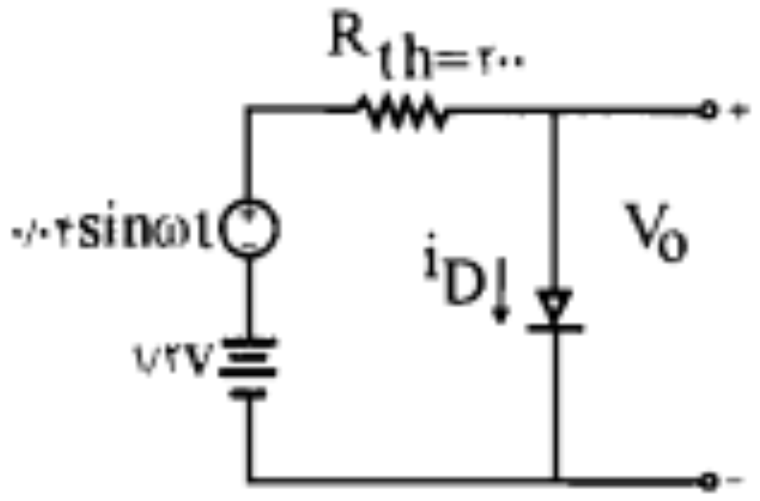
$$\begin{cases} R_{th} = ۱۵۰^{\Omega} \,\|\, ۱۰۰^{\Omega} + ۱۴۰^{\Omega} = ۲۰۰^{\Omega} \\ V_{th} = ۲ \times \frac{۱۵۰}{۱۵۰ + ۱۰۰} = ۱/۲^{V} = V_{AB} \end{cases}$$

و تونن دو سر دیود در شکل ac با بی‌اثر کردن منبع dc به دست می‌آید.

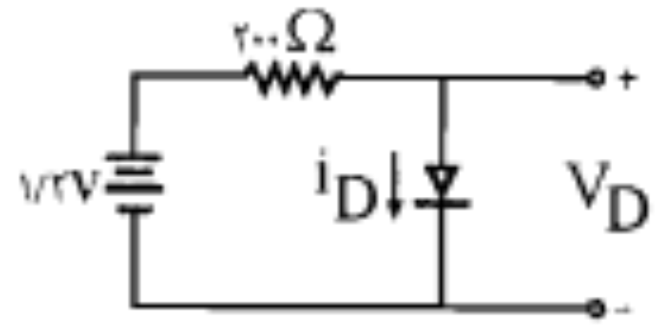


$$\begin{cases} R_{th} = ۱۵۰^{\Omega} \,\|\, ۱۰۰^{\Omega} + ۱۴۰^{\Omega} = ۲۰۰^{\Omega} \\ V_{th} = ۰/۱\,isn\,\omega t \times \frac{۱۰۰}{۱۰۰ + ۵۰} = ۰/۰۴\,\sin\omega t \end{cases}$$

پس مدار معادل تونن به صورت زیر می‌باشد:



ب) برای به دست آوردن جریان dc دیود منبع سینوسی در مدار معادل تونن اتصال کوتاه می‌شود:



$$V_D = ۱/۲^V - ۲۰۰ \times ۱۰^{-۳} i_D = ۱/۲^V - ۰/۲\, i_D$$

فرض مسئله $i_D = ۱۰^{-۶}(e^{\frac{V_D}{V_T}} - ۱)$: از طرفی داریم

$$\Rightarrow i_D = ۱۰^{-۶}\left(e^{\frac{۱/۲ - ۰/۲ i_D}{۲۶ \times ۱۰^{-۳}}} - ۱\right) \times ۱۰^۳$$

$$\Rightarrow ۱۰^۳ i_D = \left[e^{\left(\frac{۱/۲ - ۰/۲ i_D}{۲۶} \times ۱۰۰۰\right)} - ۱\right]$$

از روش سعی و خطا استفاده می‌کنیم:

فرض $V_D = ۰/۲^V \Rightarrow I_D = \frac{۱/۲ - V_D}{۰/۲} = \frac{۱/۲ - ۰/۲}{۰/۲} = ۵\,mA$

$$\to ۱۰^۳ \times ۵ = e^{\left(\frac{۱/۲ - ۰/۲ \times ۵}{۲۶}\right) \times ۱۰۰۰} - ۱ \Rightarrow ۵۰۰۰ \neq ۲۱۹۱/۴$$

پس طرف دوم باید بزرگتر شوند لذا i_D را باید کوچکتر انتخاب کنیم:

$$i_D = ۴/۹^{mA} \Rightarrow ۴/۹ \times ۱۰^۳ = e^{\left(\frac{۱/۲ - ۴/۹ \times ۰/۲}{۲۶}\right) \times ۱۰۰۰} - ۱ = ۴۷۲۸$$

پس $i_D = ۴/۹\,mA$ را می‌پذیریم.

ج) $r_d = \frac{V_T}{i_D} = \frac{۲۶\,mv}{۴/۹\,mA} = ۵/۳\,Ω$

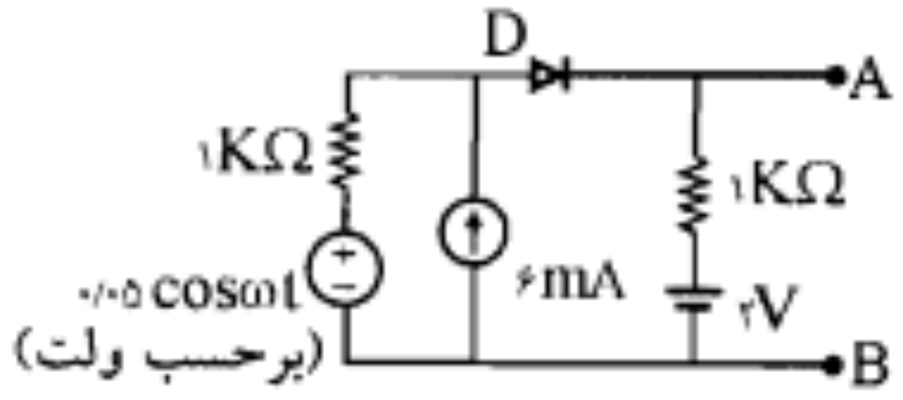
د) $V_o = V_D = ۱/۲ - ۰/۲ i_D = ۱/۲ - ۰/۲ \times ۴/۹ = ۰/۲۲^V$

۱۳ ـ در مدار شکل م ـ ۱۳ دیودها دارای $I_s = ۱nA$ مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) نقطه کار DC دیود

ب) مقاومت دینامیکی دیود

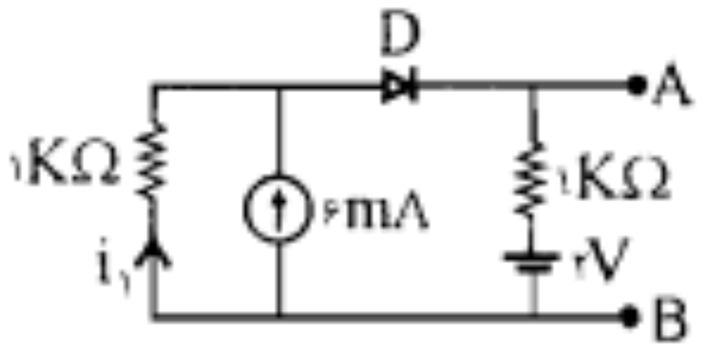
ج) $V_{AB}(t)$



شکل م-۱۳

☑ **راه حل:**

الف) برای تعیین نقطه کار DC دیود مدار را تحلیل DC می‌کنیم:



KVL: $۱kΩ \times i_۱ + V_D + i_D \times ۱kΩ + ۲ = ۰ \to i_۱ + V_D + i_D + ۲ = ۰$

KCL: $i_۱ = i_D - ۶\,mA$

$$\to \begin{cases} V_D + ۲ i_D = ۴ \\ i_D = I_s e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} \end{cases} \to V_D + ۲ I_s e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} = ۴ \to V_D + ۲ \times ۱nA\, e^{\frac{V_D}{۵۲}} = ۴$$

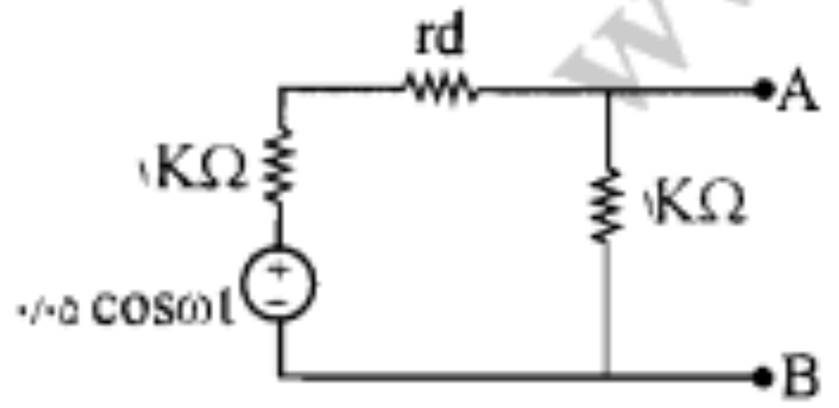
$$\frac{V_D}{۵۲} = x \to V_D = ۵۲x \to ۵۲x + ۲ \times ۱۰^{-۶} e^x = ۴$$

از حل این معادله مقادیر زیر به دست می‌آید $I_{DQ} = ۱/۶\,mA$ و $V_D = ۰/۷۴\,V$

ب) $r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{۲ \times ۲۶}{۱/۶۳} = ۳۲^Ω$

ج) تحلیل ac:

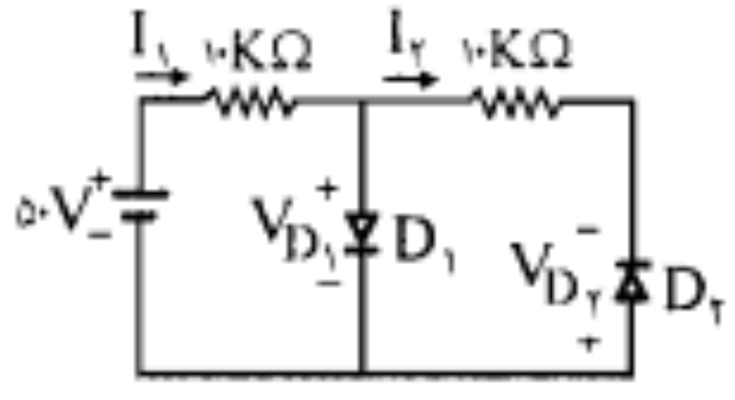
با استفاده از تقسیم ولتاژ داریم: $V_{AB}(t) = \frac{۱۰۰۰ \times ۰/۰۵}{۱۰۰۰ + ۳۲ + ۱۰۰۰} \cos\omega t = ۰/۰۲۴ \cos\omega t$



۱۴ ـ در مدار شکل م ـ ۱۴، دیودها دارای $V_\gamma = ۰/۷V$ و $R_f = r_z = ۵۰Ω$ و ولتاژ شکست ۲۵V هستند. مطلوب است:

الف) $I_۱$، $I_۲$، $VD_۱$، $VD_۲$.

ب) با تغییر جهت هر دو دیود، بند (الف) را تکرار کنید.



شکل م-۱۴

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

با فرض قطع بودن دیود $D_۲$ داریم: $I_۲ = ۰ \quad , \quad I_۱ = \frac{۵۰ - ۰/۷}{۱۰۰۰۰ + ۵۰} = ۴/۹\,mA$

$$VD_۱ = ۵۰ I_۱ + ۰/۷ = ۵۰ \times ۴/۹\,mA + ۰/۷ = ۰/۹۴۵\,V$$

پس فرض قطع بودن دیود $D_۲$ درست می‌باشد و $D_۲$ به شکست نمی‌رود.

$$\rightarrow V_{D_۲} = = -V_{D_۱} = -\,۰/۹۴۵\,V$$

ب) وقتی جهت دیودها عوض می‌شود فرض می‌کنیم دیود $D_۱$ قطع می‌باشد و با این فرض مسئله را حل می‌کنیم.

$$I_۱ = \frac{۵۰ - ۰/۷}{۲۰۰۰۰ + ۵۰} = ۲/۴۶\,mA$$

$$V_{D_۱} = ۵۰ - ۱۰ \times ۲/۴۶ = ۲۵/۴$$

پس فرض قطع بودن $D_۱$ اشتباه می‌باشد و دیود $D_۱$ به شکست می‌رود.

$$\rightarrow V_{D_۱} = ۲۵/۴$$

$$I_۲ = \frac{۲۵/۴ - ۰/۷}{۱۰۰۰۰ + ۵۰} = ۲/۴۵\,mA \quad , \quad VD_۲ = ۲/۴۵ \times ۰/۰۵ + ۰/۷ = ۰/۸۲۲\,V$$

۱۵ـ در مدار شکل م ـ ۱۵ معادله مشخصه دیود را به صورت زیر در نظر بگیرید.

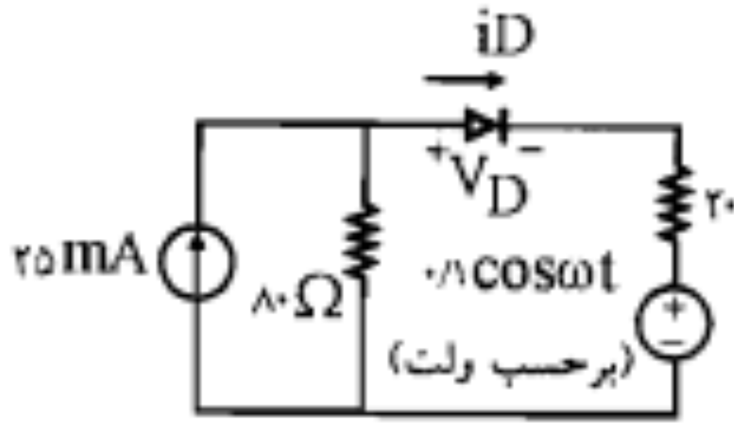
$$i_D = \begin{cases} ۲۰۰(V_D - ۰/۵)^۲ & V_D \geq ۰/۵ \\ ۰ & V_D \leq ۰/۵ \end{cases}$$

(i_D بر حسب mA و V_D بر حسب V) مطلوب است محاسبه مقادیر زیر:

الف) نقطه کار DC دیود.

ب) مقاومت دینامیکی دیود

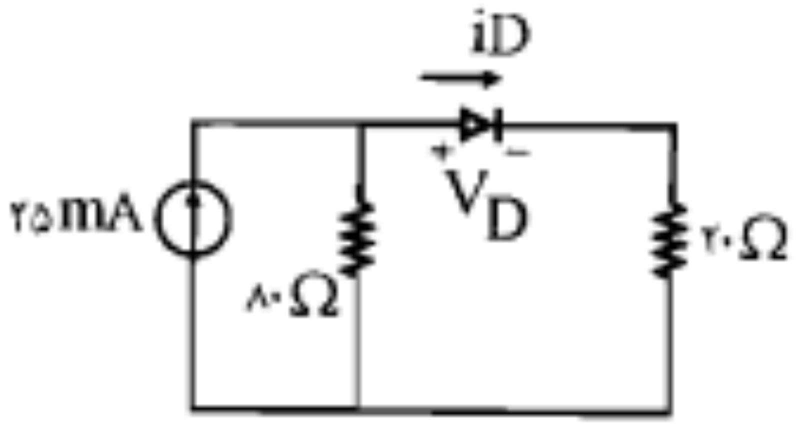
ج) $i_D(t)$



شکل م-۱۵

☑ **راه حل:**

الف) برای به دست آوردن نقطه کار DC دیود مدار را تحلیل DC می‌کنیم:



$$KVL: ۸۰(I_D - ۲۵ \times ۱۰^{-۳}) + V_D + ۲۰ I_D = ۰$$

$$\rightarrow ۱۰۰ I_D + V_D - ۲ = ۰ \qquad (I)$$

طبق فرض مسئله داریم: $I_D = ۲۰۰(V_D - ۰/۵)^۲ \quad (II)$ ، I_D بر حسب mA می‌باشد.

با قرار دادن رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$۱۰۰ \times \left[۰/۲(V_D - ۰/۵)^۲ \right] + V_D - ۲ = ۰$$

$$\rightarrow ۲۰(V_D - ۰/۵)^۲ + V_D - ۲ = ۰$$

$$۲۰ V_D^۲ - ۲۰ V_D + ۵ + V_D - ۲ = ۰ \rightarrow$$

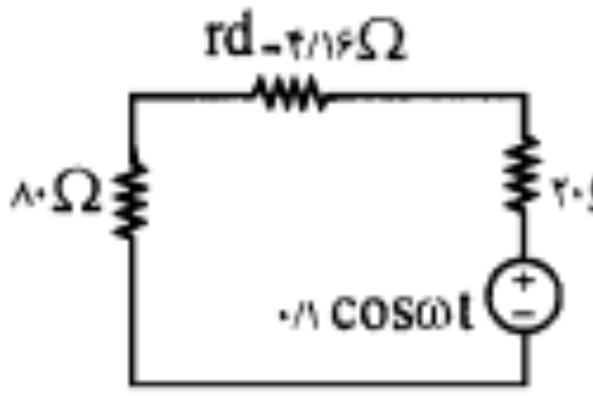
$$۲۰ V_D^۲ - ۱۹ V_D + ۳ = ۰$$

از حل این معادله $V_D = ۰/۷۵\,V$ به دست می‌آید. با قرار دادن این مقدار در رابطه (II) مقدار $I_D = ۱۲/۵\,mA$ به دست می‌آید.

ب)

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{۵۲}{۱۲/۵} = ۴/۱۶\,\Omega$$

ج) تحلیل ac:



$$i_D = \frac{-۰/۱ \cos \omega t}{۸۰ + ۲۰ + ۴/۱۶} = -۰/۹۶ \cos \omega t \ (A)$$

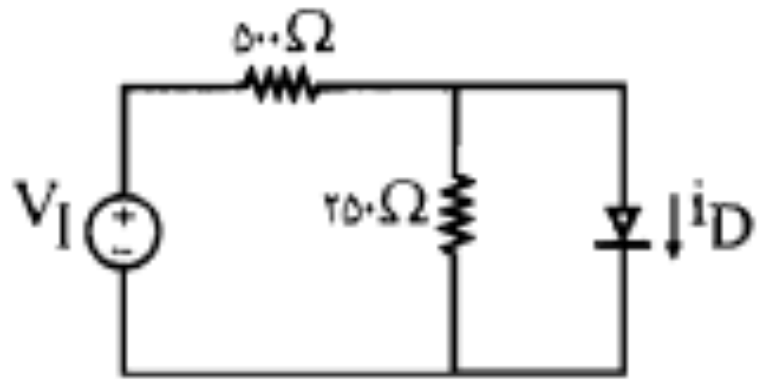
$$i(t) = i_D + I_D = -۰/۹۶ \cos \omega t + ۱۲/۵ \times ۱۰^{-۳} \ (A)$$

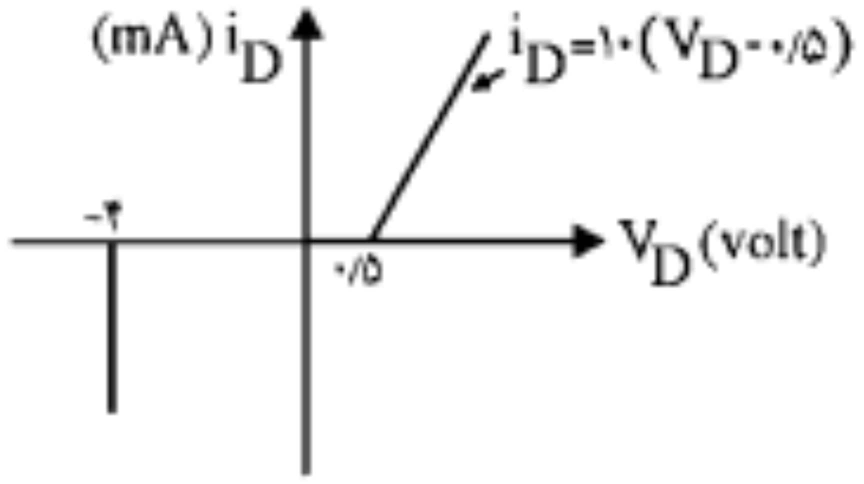
۱۶ـ شکل موج ورودی، مشخصه ولتاژ ـ جریان دیود و مدار شکل م ـ ۱۶ را در نظر بگیرید.

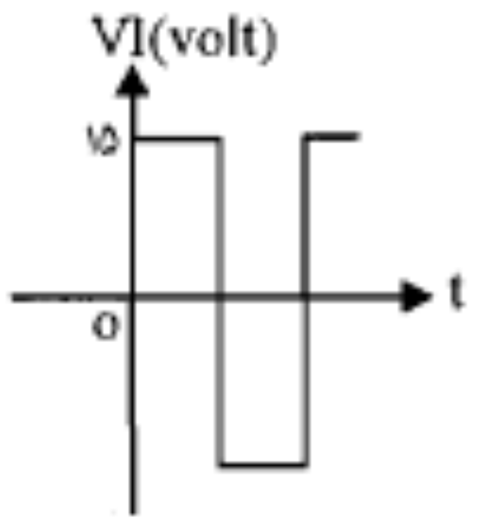
الف) مدار معادل تونن دو سر دیود را به دست آورید.

ب) $i_D(t)$ را رسم کنید.

ج) جریان متوسط دیود را به دست آورید.

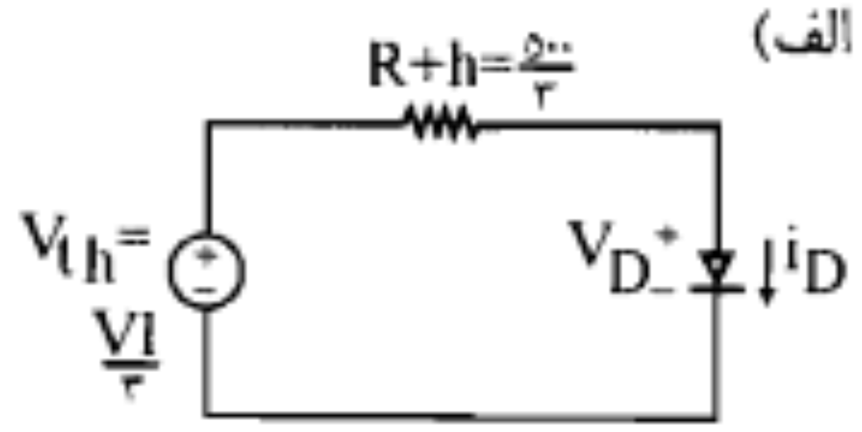






☑ **راه حل:**

الف)



$$\begin{cases} R_{th} = 250^{\Omega} \parallel 500^{\Omega} = \frac{500}{3}^{\Omega} \\ V_{th} = V_I \times \frac{250}{250+500} = V_I \times \frac{1}{3} = \frac{V_I}{3} \end{cases}$$

ب) تغییرات V_I شامل دو قسمت می‌باشد

$$\begin{cases} V_I = 15V \\ V_I = -15V \end{cases}$$

$$V_I = 15V \Rightarrow KVL: V_D = V_{th} - R_{th} \times i_D = \frac{15}{3} - \frac{500}{3} i_D \Rightarrow i_D = \frac{15 - 3V_D}{500} A$$

$$\Rightarrow i_D = 2(15 - 3V_D)\, mA$$

این رابطه را در رابطه دیود (نمودار i_D بر حسب V_D) قرار می‌دهیم. طبق نمودار فرض می‌کنیم دیود در $V_D > 0.5^V$ در ناحیه خطی کار می‌کند پس داریم:

$$i_D = 10(V_D - 0.5) = 2(15 - 3V_D) \Rightarrow V_D = 2.19\ V$$

مقدار به دست آمده در $V_D > 0.5^V$ صدق می‌کند پس دیود در این ناحیه در ناحیه خطی کار می‌کند.

$$\Rightarrow V_I = 15V \quad , \quad V_D = 2.19V$$

$$i_D = 10(V_D - 0.5) = 10(2.19 - 0.5) = 16.9\ mA$$

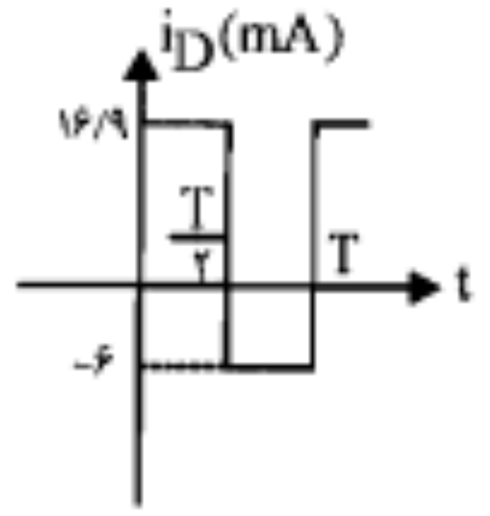
$$V = -15V \Rightarrow$$

با $V_I = -15V$ دیود در ناحیه شکست قرار دارد ($V_D = -4V$) در این حالت i_D باید منفی باشد پس i_D را حساب می‌کنیم:

$$i_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{-\frac{15}{3} - (-4)}{\frac{500}{3}} = \frac{-1}{\frac{500}{3}} = \frac{-3}{500} A \Rightarrow i_D = -6\, mA$$

i_D کمتر از صفر یعنی منفی به دست آمد لذا دیود در ناحیه شکست قرار دارد پس داریم:

$$\Rightarrow V_I = -15V \quad , \quad V_D = -4V \quad , \quad i_D = -6\, mA$$

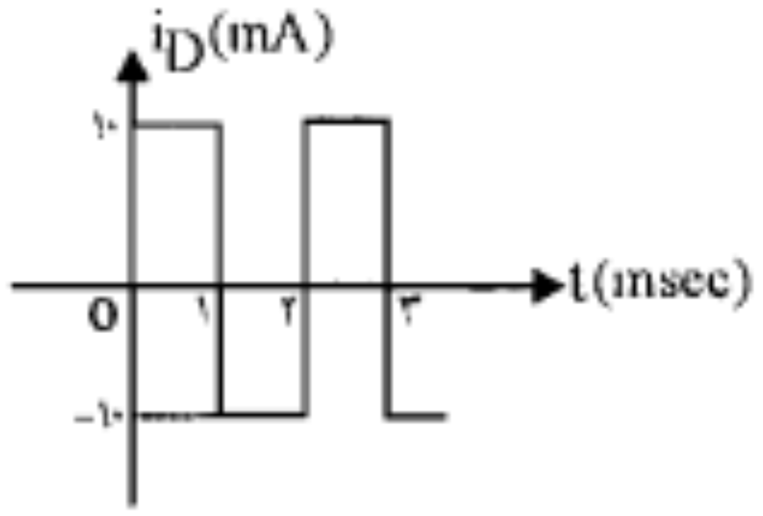


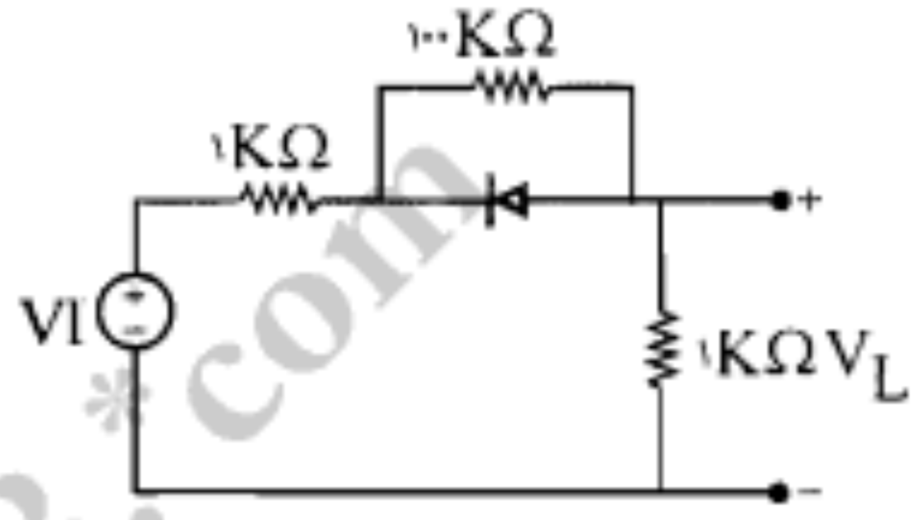
ج) $i_D = \frac{16.9 \times \frac{T}{2} - 6 \times \frac{T}{2}}{T} = \frac{16.9 - 6}{2} = \frac{10.9}{2} = 5.45\, mA$ جریان متوسط دیود

۱۷ـ مدار شکل م ـ ۱۷ را در نظر بگیرید.

الف) با فرض ایده‌آل بودن دیود ولتاژ $V_L(t)$ را به دست آورده و رسم کنید.

ب) بند (الف) را با فرض ورودی مثلثی تکرار کنید (دامنه موج ورودی را ۱۰ ولت در نظر بگیرید.)





شکل م ـ ۱۷

☑ **راه حل:**

الف) طبق نمودار V_I را بر حسب t داریم:

اگر $V_I = 10^V$ باشد فرض می‌کنیم D خاموش باشد در این صورت داریم:

$$V_L = V_I \times \frac{1}{1+100+1} = V_I \times \frac{1}{102} = \frac{10}{102} = 0.1V$$

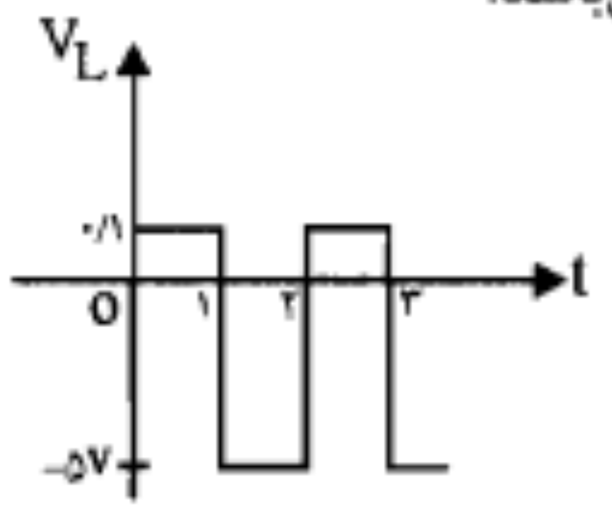
$$V_D = -V_I \times \frac{100}{100+1+1} = -0.1 \times \frac{100}{102} = -9.8^V$$

چون V_D منفی می‌باشد و مقدارش برابر -9.8^V شد پس فرض قطع بودن دیود درست می‌باشد.

اگر $V_I = -10^V$ باشد فرض می‌کنیم دیود روشن می‌باشد پس داریم:

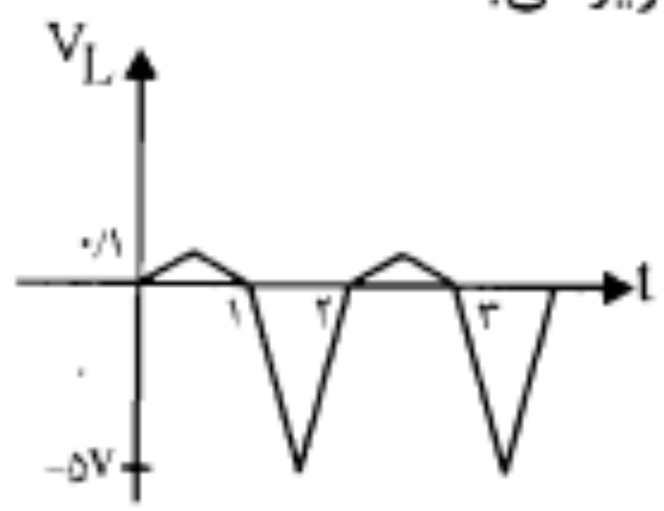
$$V_L = -10 \times \frac{1}{1+1} = -5V \quad , \quad i_D = \frac{0 - (-10)}{2} = 5mA$$

پس روشن بودن دیود درست می‌باشد پس شکل موج V_L به صورت زیر می‌باشد.



www.PnuEB.com

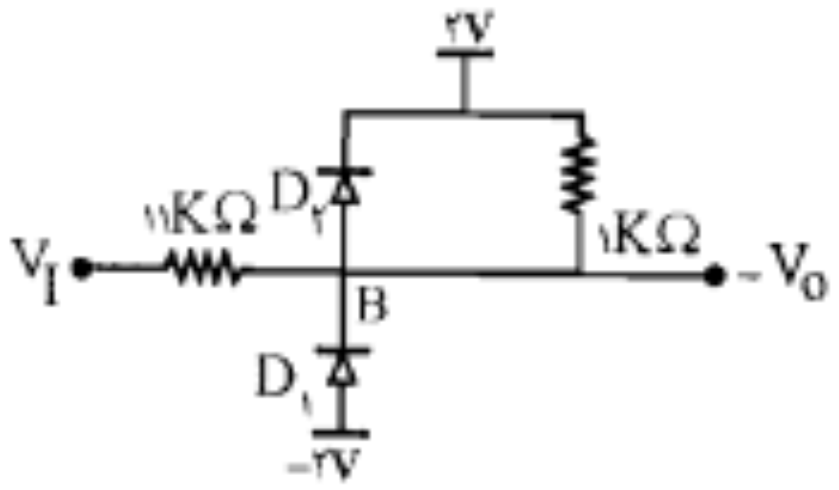
ب) اگر ورودی موج مثلثی با دامنه ۱۰ ولت باشد خروجی به صورت شکل زیر می‌باشد:



۱۸ ـ در مدار شکل م ـ ۱۸ دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.

الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید. ($-۸V < V_I < ۸V$)

ب) پس از حذف مقاومت موازی $D_۲$ مشخصه را مجدداً رسم نمایید.



شکل م-۱۸

☑ **راه حل:**

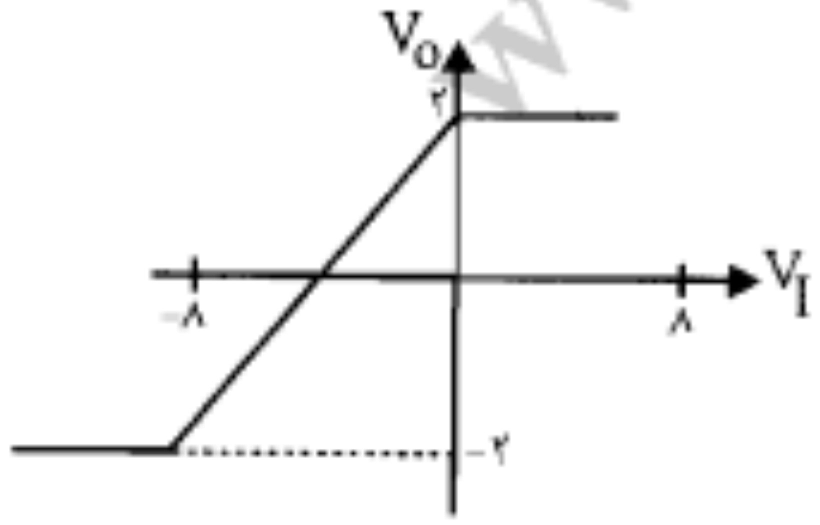
الف)

$$V_B = ۲ + \frac{۱K\Omega \times V_I}{۱k\Omega \times ۱k\Omega} = ۲ + ۰/۵V_I$$

$$\begin{cases} D_۱: ON \\ D_۲: Off \end{cases} : \ V_B < -۲V \rightarrow ۲ + ۰/۵V_I < -۲V \rightarrow V_I < -۸ \ , \ V_o = -۲V$$

$$\begin{cases} D_۲: ON \\ D_۱: Off \end{cases} : \ V_B > ۲V \rightarrow ۲ + ۰/۵V_I > ۲ \rightarrow V_I > ۰ \ ; \ V_o = ۲V$$

$$\begin{cases} D_۱: Off \\ D_۲: Off \end{cases} : -۲ < V_B < ۲ \rightarrow V_۰ = V_B = ۲ + ۰/۵V_I$$

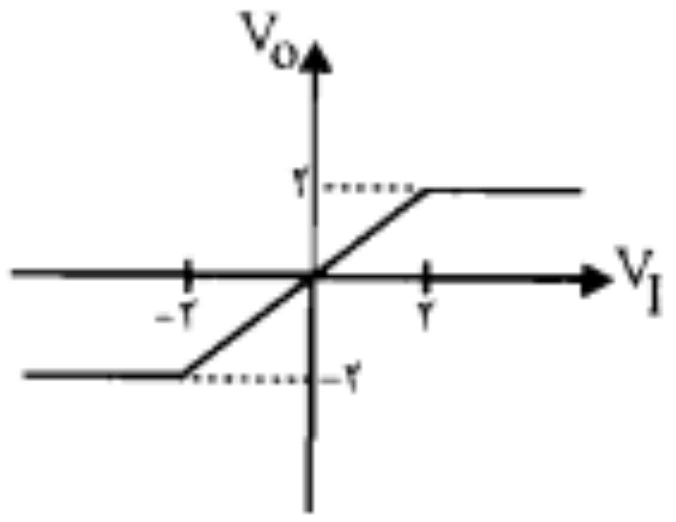


ب)

$$\begin{cases} D_۱: Off \\ D_۲: ON \end{cases} : V_I > ۲ \rightarrow V_o = ۲V$$

$$\begin{cases} D_۱: ON \\ D_۲: Off \end{cases} : V_I < -۲V \rightarrow V_o = -۲V$$

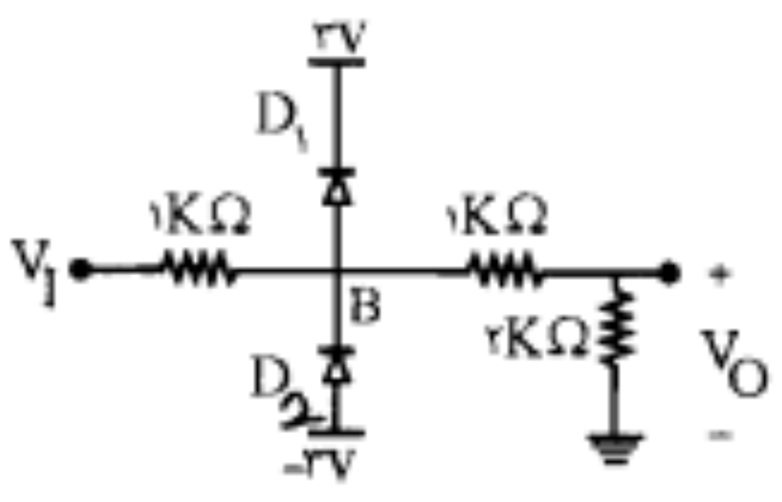
$$\begin{cases} D_۱: off \\ D_۲: Off \end{cases} : -۲^V < V_I < ۲V \rightarrow V_o = V_I$$



۱۹ ـ در مدار شکل م ـ ۱۹ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید ($-۷V \le V_I \le ۷V$)

ب) اگر جهت $D_۱$ عوض شود مشخصه جدید را رسم نمایید.



شکل م-۱۹

☑ **راه حل:**

الف) ابتدا ولتاژ نقطه B را بر حسب V_I می‌نویسیم:

$$V_B = \frac{(۱+۲)k\Omega \times V_I}{(۱+۲)k\Omega + ۱k\Omega} = \frac{۳}{۴}V_I$$

از تقسیم ولتاژ استفاده می‌کنیم:

$$V_۰ = \frac{۲k\Omega \times V_B}{۲k\Omega + ۱k\Omega} = \frac{۲}{۳}V_B$$

برای اینکه دیود $D_۲$ روشن باشد باید ولتاژ نقطه B از ۳v- کمتر باشد:

$$D_۲: ON \ ; \quad V_B < -۳ \rightarrow \frac{۳}{۴}V_I < -۳ V_I < -۴^V$$

$$\rightarrow V_B = -۳V \rightarrow V_۰ = \frac{۲}{۳} \times -۳^V = -۲^V$$

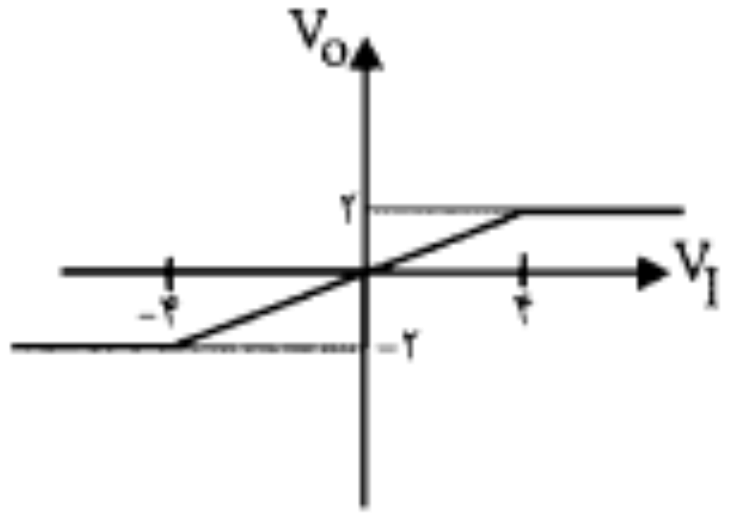
برای اینکه دیود $D_۱$ روشن باشد باید ولتاژ نقطه B از ۳V بیشتر باشد:

$$D_۱: ON \ ; \ V_B > ۳^V \rightarrow \frac{۳}{۴}V_I > ۳^V \rightarrow V_I > ۴V \rightarrow V_B = ۳^V \rightarrow$$

$$V_۰ = \frac{۲}{۳} \times ۳ = ۲V$$

و در حالتی که $-۳^V < V_B < ۳^V$ باشد هر دو دیود خاموش می‌باشند:

$$D_۱, D_۲: Off \ ; \ -۳^V < V_B < ۳^V \rightarrow -۴^V < V_i < ۴^V \rightarrow V_۰ = \frac{۲^{K\Omega} \times V_I}{(۲K\Omega + ۱K\Omega + ۱K\Omega)} = \frac{۱}{۲}V_I$$



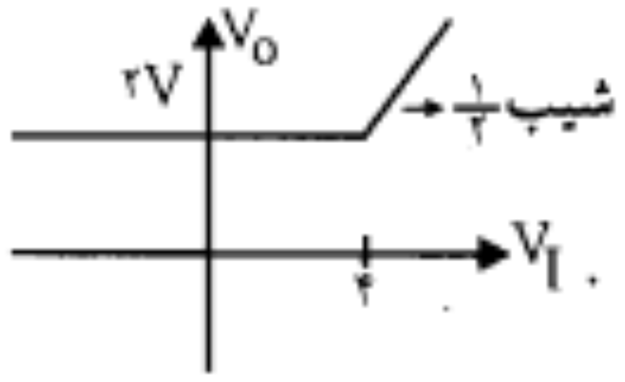
www.PnuEB.com

ب) وقتی جهت دیود $D_۱$ عوض می‌شود برای اینکه دیود $D_۱$ باشد باید $V_B < ۳^V$ باشد.

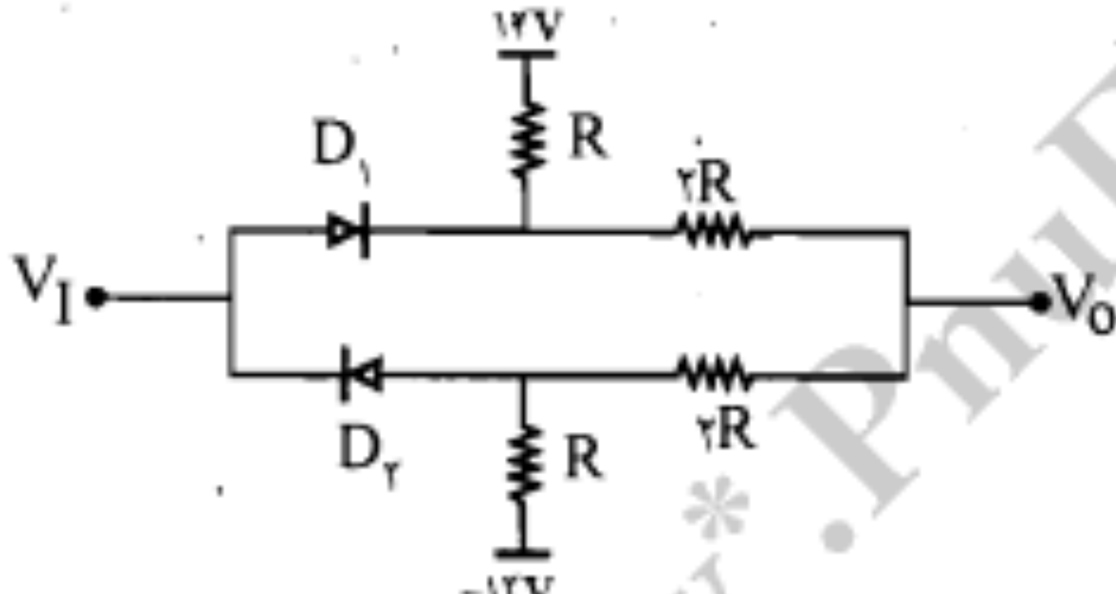
$$D_۱ : ON \ ; \ V_B < ۳^V \rightarrow V_I < ۴^V \rightarrow V_B = ۳^V \rightarrow V_۰ = ۲^V$$

و وقتی $V_B > ۳^V$ شود هر دو دیود خاموش می‌شوند پس داریم:

$$D_۱ , D_۲ : off \quad ; \quad V_B > ۳^V \rightarrow V_I > ۴^V \rightarrow V = \frac{۱}{۲} V_I$$



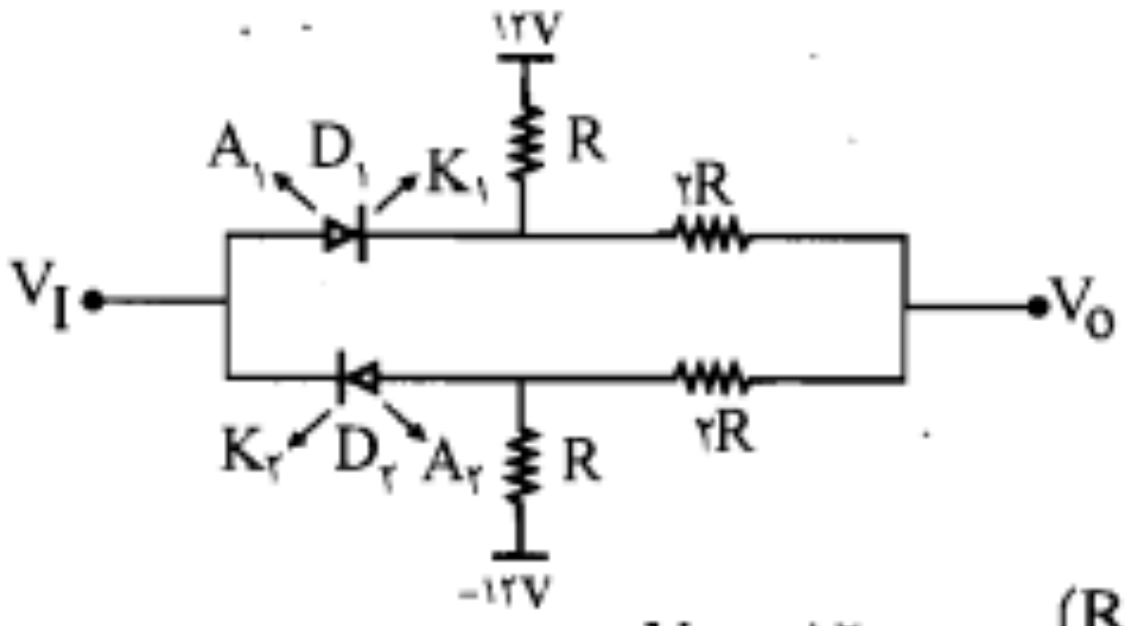
۲۰ ـ در مدار شکل م ـ ۲۰ برای هر یک از دیودها داریم: $R_r = \infty$ و $R_f = ۰$ و $V_\gamma = ۰/۷V$ مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم کنید.



شکل م ـ ۲۰

☑ **راه حل:**

ابتدا فرض می‌کنیم هر دو دیود خاموش باشند در این صورت با استفاده از جمع آثار خواهیم داشت:



$$V_O = ۱۲ \times \frac{(R + ۲R)}{(R + ۲R + R + ۲R)} + (-۱۲) \times \frac{(R + ۲R)}{(R + ۲R + R + ۲R)}$$

$$\rightarrow V_O = ۰^V$$

شرط خاموش بودن دیود $D_۱$ به صورت مقابل می‌باشد:

$$V_{A_۱} - V_{K_۱} < ۰/۷^V$$

$$\begin{cases} V_{K_۱} = ۱۲ \times \frac{(۲R + R + ۲R)}{(R + ۲T + R + ۲R)} - ۱۲ \times \frac{R}{(R + ۲R + R + ۲R)} \Rightarrow V_{K_۱} = ۱۲ \times \frac{۵}{۶} - ۱۲ \times \frac{۱}{۶} \\ V_{A_۱} = V_I \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{K_۱} = ۱۰ - ۲ = ۸V$$

$$\Rightarrow V_{A_۱} - V_{K_۱} < ۰/۷^V \Rightarrow V_I - ۸ < ۰/۷ \Rightarrow V_I < ۸/۷^V$$

شرط خاموش بودن دیود $D_۲$ به صورت مقابل می‌باشد: $V_{A_۲} - V_{K_۲} < ۰/۷^V$

$$\begin{cases} V_{A_۲} = -۱۲ \times \frac{(R + ۲R + ۲R)}{(R + ۲R + R + ۲R)} + ۱۲ \times \frac{R}{(R + ۲R + R + ۲R)} = -۱۲ \times \frac{۵}{۶} + ۱۲ \times \frac{۱}{۶} = -۸V \\ V_{K_۲} = V_I \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{A_۲} - V_{K_۲} < ۰/۷^V \Rightarrow -۸ - V_I < ۰/۷ \rightarrow V_I > -۸/۷^V$$

پس در صورتی که $-۸/۷^V < V_I < ۸/۷^V$ باشد هر دو دیود خاموش می‌باشند. و در این صورت $V_۰$ نیز صفر می‌باشد:

$$-۸.۷^V < V_I < ۸.۷^V \Rightarrow \begin{cases} D_۱ : off \\ D_۲ : off \end{cases} , \ V_O = ۰^V$$

و اگر $V_I > ۸/۷$ شود در این صورت دیود $D_۱$ روشن می‌شود و دیود $D_۲$ همچنان خاموش می‌باشد در این صورت V_O را با استفاده از جمع آثار به دست می‌آوریم: (وقتی $D_۱$ روشن می‌شود به جای آن در مدار یک منبع ولتاژ به اندازه $۰/۷^V$ در نظر می‌گیریم.)

$$V_O = (V_I - ۰/۷^V) \times \frac{(R + ۲R)}{(R + ۲R + \eta R)} + (-۱۲) \times \frac{۲R}{(R + ۲R + ۲R)} = ۰/۶ V_I - ۵/۲۲$$

$$\Rightarrow V_I > ۸/۷^V \Rightarrow \begin{cases} D_۱ : ON \\ D_۲ : Off \end{cases} , \quad V_O = ۰/۶ V_I - ۵/۲۲$$

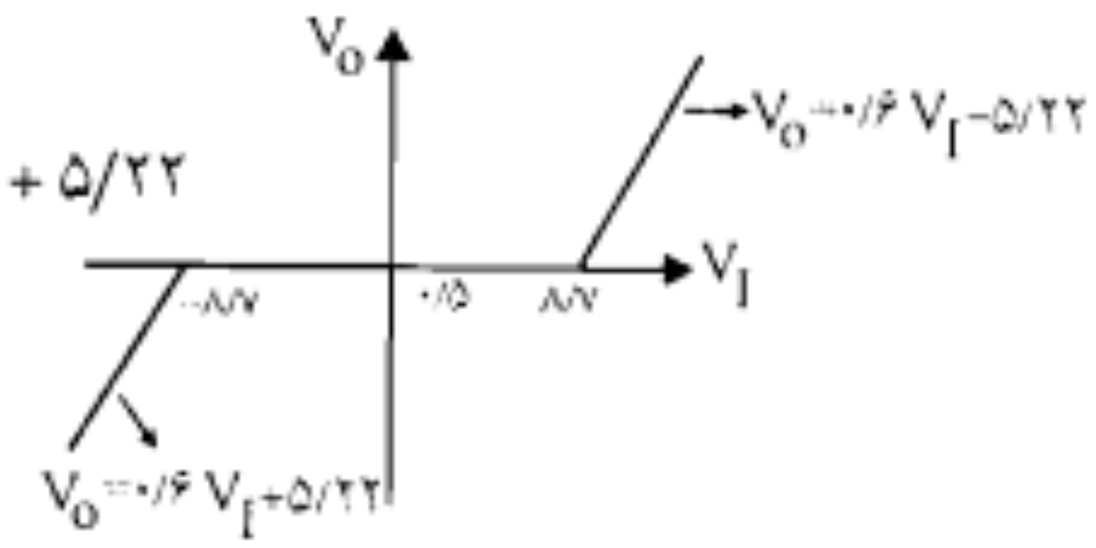
و اگر $V_I < -۸/۷$ باشد در این صورت $D_۲$ روشن می‌شود و $D_۱$ خاموش می‌باشد پس داریم: (در این حالت به جای $D_۲$ یک منبع ولتاژ به اندازه $۰/۷^V$ در مدار در نظر می‌گیریم.)

$$V_O = ۱۲ \times \frac{۲R}{۲R + ۲R + R} + (V_I + ۰/۷) \times \frac{(R + ۲R)}{(R + ۲R + ۲R)}$$

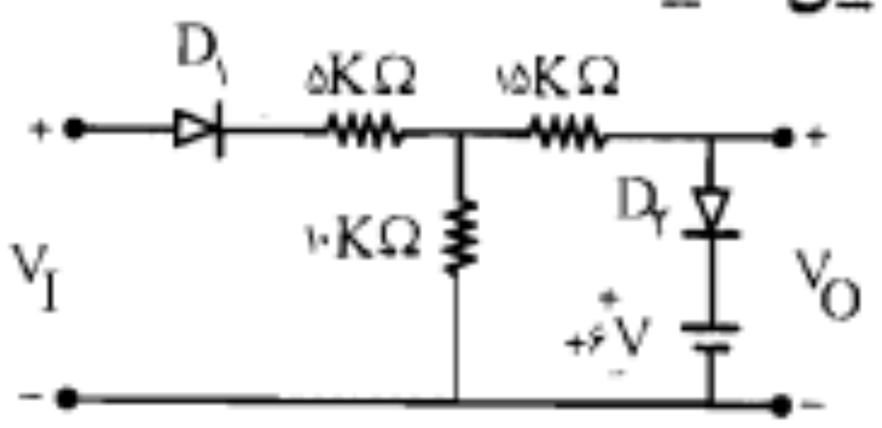
www.*PnuEB*.com

$$\Rightarrow V_o = 0/6\,V_I + 5/22$$

$$\Rightarrow V_I < -8/7^V \Rightarrow \begin{cases} D_1: Off \\ D_2: ON \end{cases} \Rightarrow V_o = 0/6\,V_I + 5/22$$



۲۱ ـ در شکل م ـ ۲۱ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه انتقالی مدار را برای $-20V \le V_I \le 20\,V$ رسم نموده، در هر ناحیه از مشخصه، وضعیت هر یک از دیودها را تعیین نمایید.



شکل م-۲۱

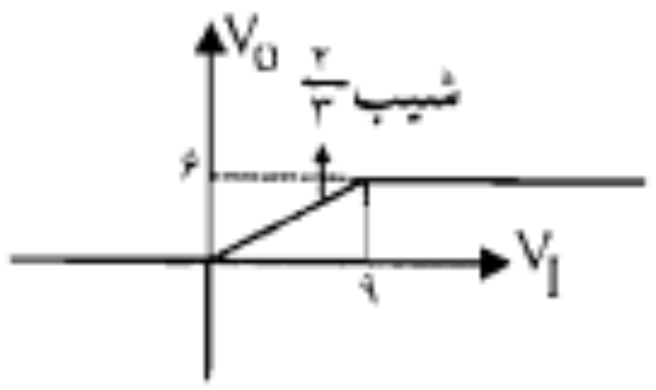
☑ **راه حل:**

$$V_I < 0^V \to \begin{cases} D_1: Off \\ D_2: Off \end{cases} \to V_o = 0^V$$

$$0^V < V_I < ? \to \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \end{cases} \to \frac{V_I - V_o}{5} = \frac{V_o}{10} \to 2V_I - 2V_o = V_o$$

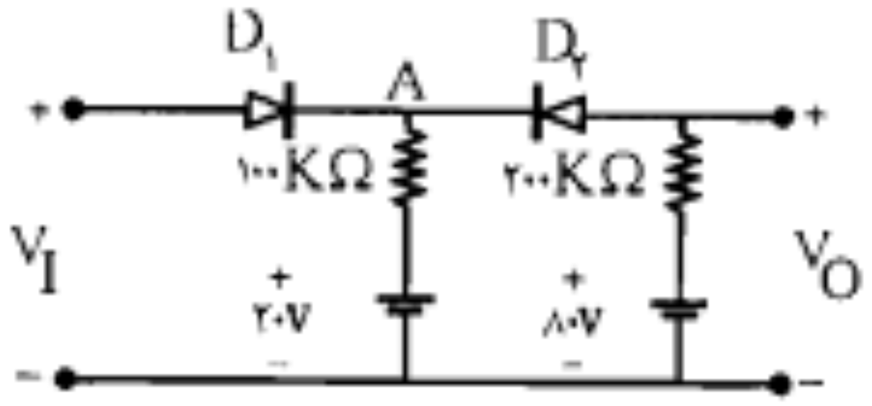
$$\to V_o = \frac{2}{3}V_I \to V_o = 6V \to V_I = 9$$

$$\to 0 < V_I < 9^V \quad \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \end{cases}$$



$$V_I > 9^V \to \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: ON \end{cases} \to V_o = 6V$$

۲۲ ـ ولتاژ ورودی V_I مدار شکل م ـ ۲۲ از ۰ تا ۱۰۰ ولت به صورت خطی تغییر می‌کند. ولتاژ خروجی V_o را با همان مقیاس زمانی V_I رسم نمایید. (دیودها را ایده‌آل فرض کنید)



شکل م-۲۲

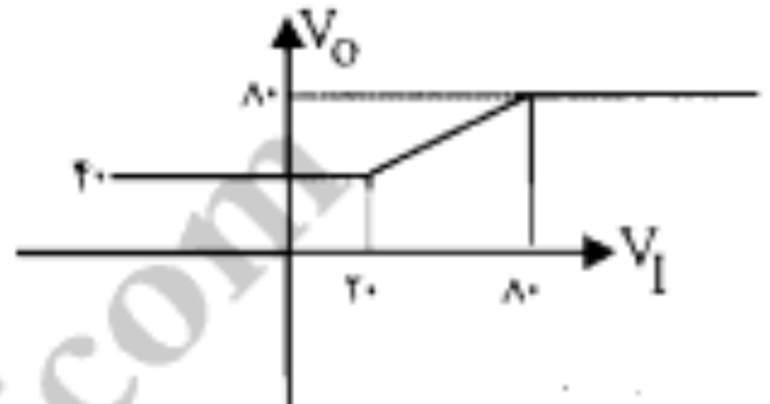
☑ **راه حل:**

وقتی $V_I < 20\,V$ باشد D_1 خاموش و D_2 روشن می‌باشد با استفاده از تقسیم ولتاژ مقدار V_o را به دست می‌آوریم.

$$V_I < 20^V \to \begin{cases} D_1: Off \\ D_2: ON \end{cases} \to \frac{V_o - 20}{100} + \frac{V_o - 80}{200} = 0 \to V_o = 40^V$$

وقتی V_I بین ۲۰ V و ۸۰ V باشد هر دو دیود روشن می‌باشند پس داریم

$$V_o = V_I$$

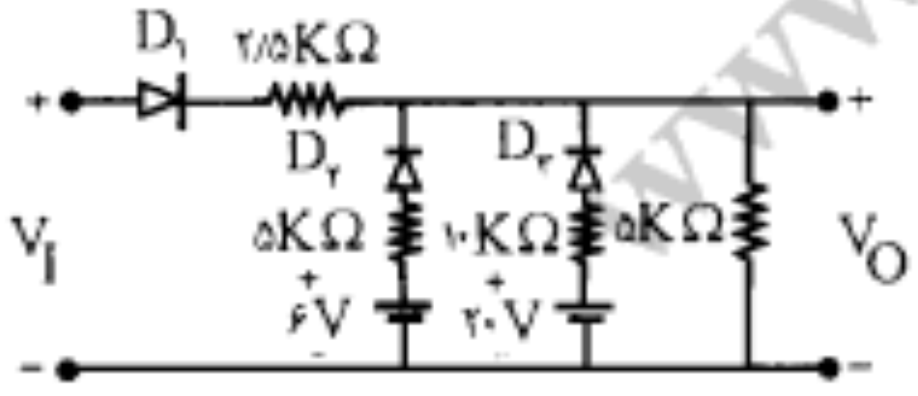


$$20^V < V_I < ?^{80} \to \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: ON \end{cases} \to V_o = V_I$$

وقتی V_I بزرگتر از ۸۰ ولت می‌شود دیود D_1 روشن می‌باشد و D_2 خاموش (چون در این صورت در D_2 ولتاژ آند از کاتد کوچکتر می‌باشد) پس در مدار معادل داریم $V_O = 80\,V$

$$V_I > 80 \to \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \end{cases} \to V_o = 80^V$$

۲۳ ـ در مدار شکل م ـ ۲۳، با فرض ایده‌آل بودن دیودها: مشخصه انتقالی را به دست آورده و رسم نمایید. ورودی V_I از ۰ تا ۵۰ ولت تغییر می‌کند.



شکل م-۲۳

☑ **راه حل:**

حالت اول حالتی است که D_1 خاموش و D_2 روشن و D_3 خاموش است:

$$\begin{cases} D_1: Off \\ D_2: ON \\ D_3: Off \end{cases} \to V_o = \frac{6 \times 5K\Omega}{5+5} = 3^V$$

و چون $V_o = 3^V$ و D_1 هم خاموش می‌باشد پس $V_I < 3^V$

$$3^V < V_I < ?^{9V} \to \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: ON \\ D_3: Off \end{cases} \to \frac{V_o - V_I}{2.5} + \frac{V_o - 6}{5} + \frac{V_o}{5} = 0$$

$$\to V_o = \frac{V_I}{2} + \frac{3}{2} \to$$

www.PnuEB.com

و برای اینکه D_2 روشن باشد و D_3 خاموش V_o باید از ۶V کوچکتر باشد یعنی داریم:

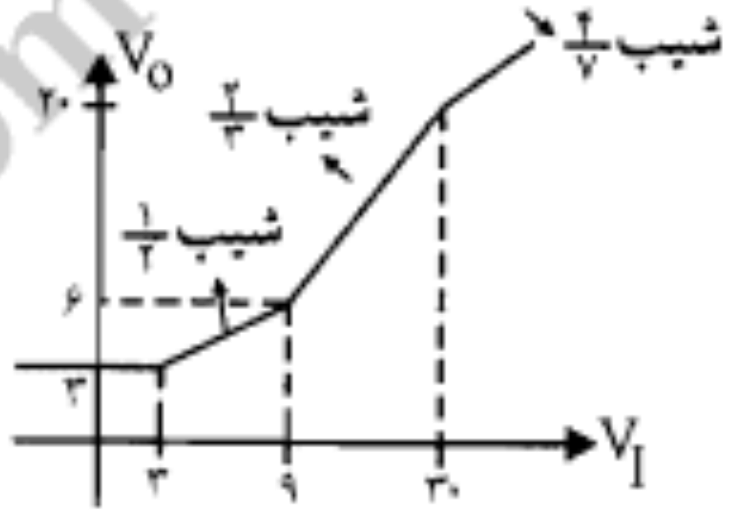
$$V_o = \frac{V_I}{2} + \frac{3}{2} < 6\,V \Rightarrow V_I < 9\,V$$

$$9^V < V_I < ?^{30V} \rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \rightarrow V_o = V_i \times \frac{5}{5+2.5} = \frac{2}{3}V_I \\ D_3: Off \end{cases}$$

برای اینکه D_3 همچنان خاموش باشد باید V_o کوچکتر از ۲۰V باشد:

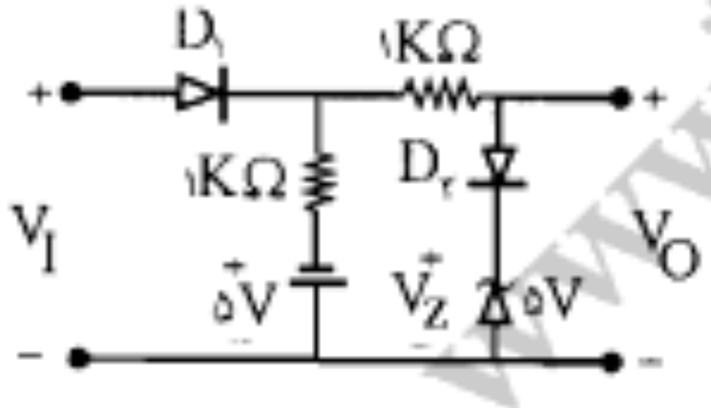
$$V_o = \frac{2}{3}V_I < 20 \rightarrow V_I < 30^V$$

$$V_I > 30^V \rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \\ D_3: ON \end{cases} \rightarrow \frac{V_o - V_I}{2/5} + \frac{V_o - 20}{10} + \frac{V_o}{5} = 0$$



$$\rightarrow V_o = \frac{4}{7}V_I + \frac{20}{7}$$

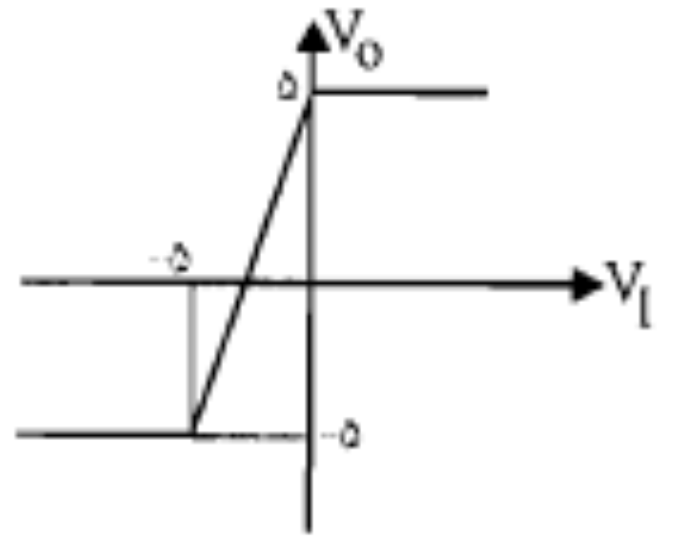
۲۴ ـ در مدار برش شکل م ـ ۲۴، مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم نمایید (دیودها را ایده‌آل فرض کنید).



شکل م-۲۴

$$V_I < -5V \rightarrow \begin{cases} D_1: Off \\ D_2: Off \end{cases} \rightarrow V_o = -5V$$

$$V_I > -5V \rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \end{cases} \Rightarrow \frac{V_I + 5^V}{1} + \frac{V_I - V_o}{1} = 0$$

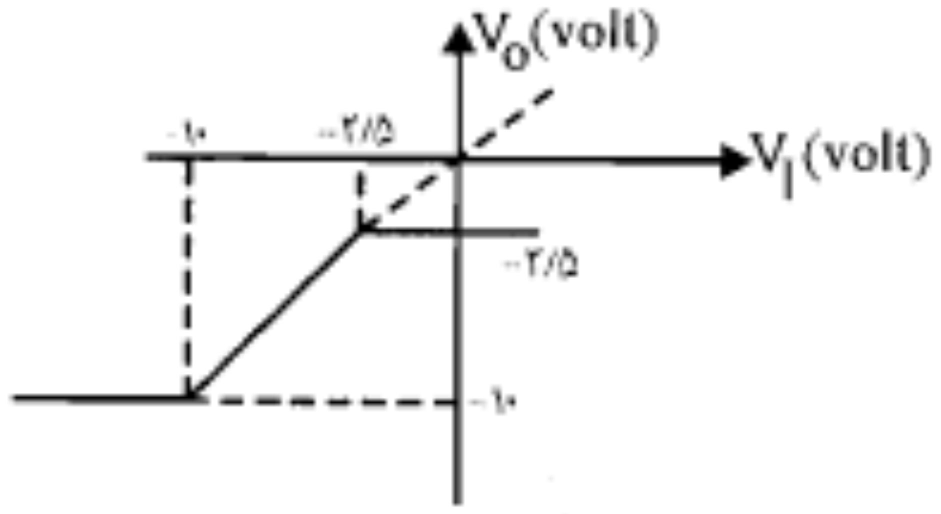


$$\rightarrow V_o = 2V_I + 5$$

برای اینکه D_2 روشن شود باید V_o بزرگتر از ۵V شود.

$$D_2: ON \rightarrow V_o > 5V \rightarrow 2V_I + 5V > 5 \rightarrow V_I > 0 \rightarrow V_o = 5V$$

۲۵ ـ مشخصه انتقالی شکل م ـ ۲۵ را در نظر بگیرید. یک مدار برای مشخصه مذکور طراحی نموده و مقادیر قطعه‌های به‌کار رفته را مشخص نمایید. (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده کنید).



شکل م-۲۵

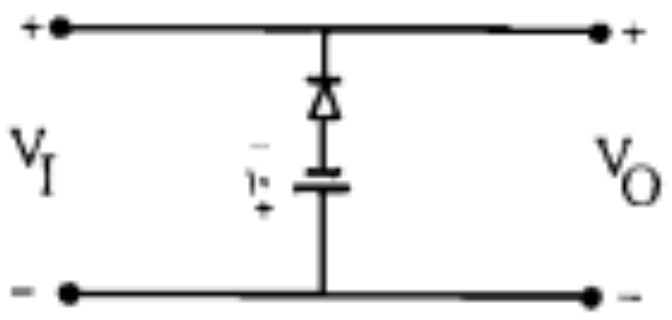
☑ راه حل:

با توجه به شکل م ـ ۲۵ داریم:

وقتی V_I کوچکتر از ۱۰V- است V_o مقدار ثابت می‌باشد

$$V_I < -10^V \rightarrow V_O = -10^V$$

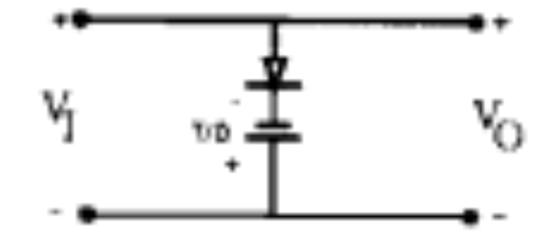
تا به اینجا شکل مدار به صورت مقابل می‌باشد. ←



وقتی V_I بزرگتر از ۲/۵V- است V_o مقدار ثابت می‌باشد.

$$V_I > -2.5^V \rightarrow V_o = -2.5^V$$

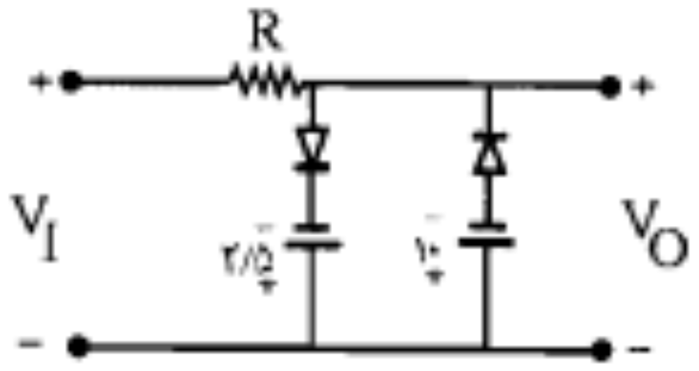
در این حالت مدار به صورت مقابل می‌باشد. ←



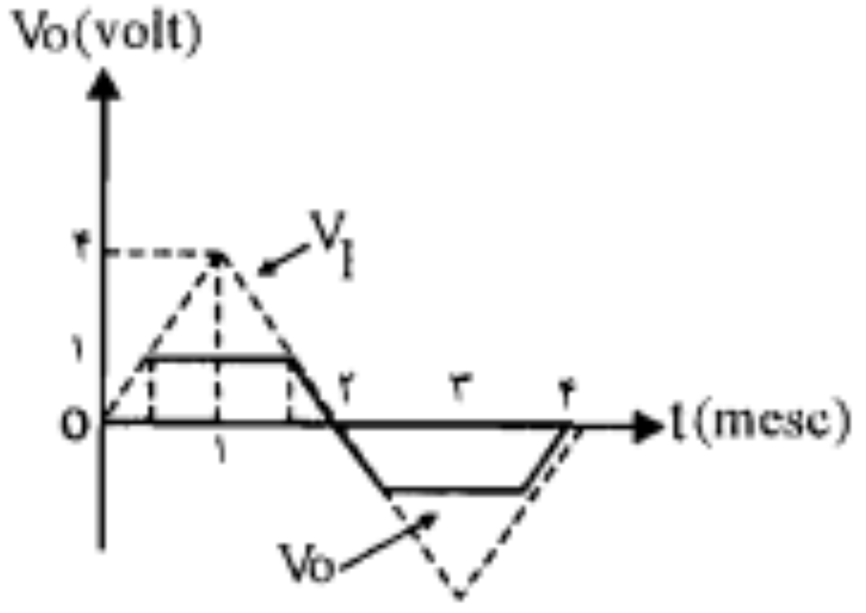
وقتی V_I بین این دو مقدار می‌باشد رابطه خطی $V_O = V_I$ برقرار می‌باشد.

$$-10^V < V_I < -2.5^V \rightarrow V_O = V_I \rightarrow$$

در حالت سوم هر دو دیود قطع هستند و همچنین یک مقاومت برای کنترل جریان و حفاظت دیودها نیاز داریم، پس مداری کلی به صورت زیر می‌باشد.



۲۶ ـ مداری طراحی کنید که از شکل موج مثلثی ورودی نشان داده شده در شکل م ـ ۲۶ ، شکل موج ذوزنقه‌ای نشان داده شده را ایجاد نماید (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده نمایید.)

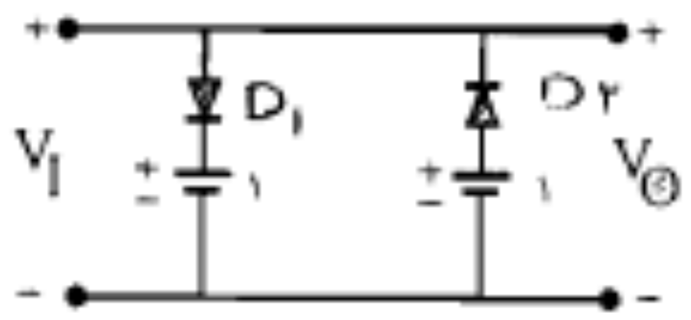


شکل م-۲۶

www.PnuEB.com

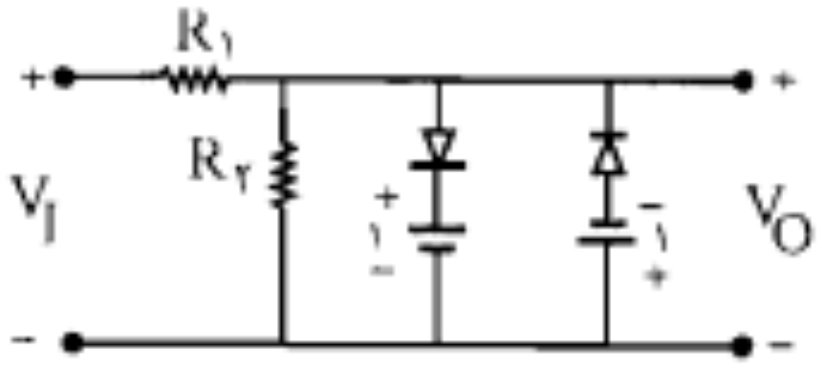
☑ **راه حل:**

به ازای V_I های بزرگتر و کوچکتر از یک مقدار خاصی مقدار V_O برابر ۱± می‌شود پس قسمت زیر حتماً باید در مدار باشد:



$$\begin{cases} V_I < -2^V : \quad V_O = -1^V \Rightarrow \begin{cases} D_2 : ON \\ D_1 : Off \end{cases} \\ V_I > 2 : \quad V_O = 1^V \Rightarrow \begin{cases} D_1 : ON \\ D_2 : Off \end{cases} \end{cases}$$

و در بقیه V_I ها، V_O کسری از V_I می‌باشد پس باید مقاومت‌های زیر را در مدار قرار دهیم تا تقسیم ولتاژ صورت گیرد.



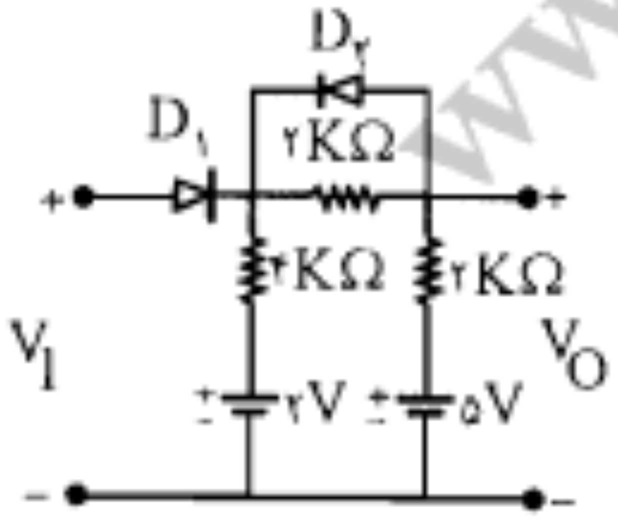
$$-2 < V_I < 2 \Rightarrow V_O = \frac{1}{2} V_I \Rightarrow \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : Off \end{cases}$$

$$V_O = \frac{R_2 V_I}{R_1 + R_2}$$

مقادیر R_1 و R_2 با توجه به نسبت V_I و V_O مشخص می‌شوند.

۲۷ـ در مدار شکل م ـ ۲۷، دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم نمایید.

☑ **راه حل:**



شکل م-۲۷

شرط ON بودن دیود D_2 به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{D_2} > 0 \Rightarrow V_I + 5 > 0 \Rightarrow V_I < 5$$

و شرط ON بدن دیود D_1 نیز چنین می‌باشد:

$$I_{D_1} > 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_1 - I_{D_2}$$

$$\Rightarrow I_{D_1} = \frac{V_I - 2}{4} + \frac{V_I - 5}{2} \Rightarrow I_{D_1} = \frac{3V_I - 12}{4} > 0 \Rightarrow V_I > 4^V$$

پس برای اینکه دیود D_1 خاموش باشد باید $V_I < 4^V$ باشد. با توجه به مطالب بالا وقتی $V_I < 4$ است D_1 خاموش و D_2 روش می‌باشد.

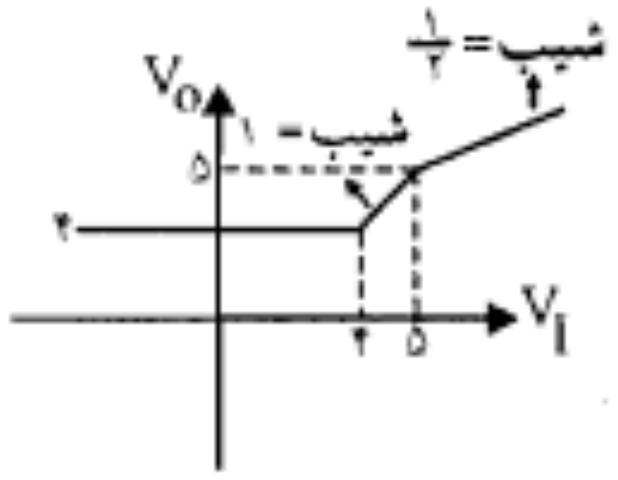
$$V_I < ?^{4V} \rightarrow \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : ON \end{cases} \rightarrow V_O = 5 - \frac{(5-2) \times 2K\Omega}{2+4} = 5 - 1 = 4V$$

وقتی V_I از 4^V بزرگتر می‌شود D_1 نیز روشن می‌گردد ⇐

$$4^V < V_I < ?^{5V} \rightarrow \begin{cases} D_1 : ON \\ D_2 : ON \end{cases} \rightarrow V_O = V_I = 5V$$

و D_2 تا وقتی روشن می‌باشد که V_I از 5^V کوچکتر باشد وقتی V_I از $5V$ بزرگتر می‌شود D_2 خاموش می‌شود. ⇐

$$V_I > 5^V \rightarrow \begin{cases} D_1 : ON \\ D_2 : Off \end{cases} \rightarrow V_O = 5 + \frac{V_I - 5}{2+2} \times 2 = 2/5 + \frac{1}{2} V_I$$

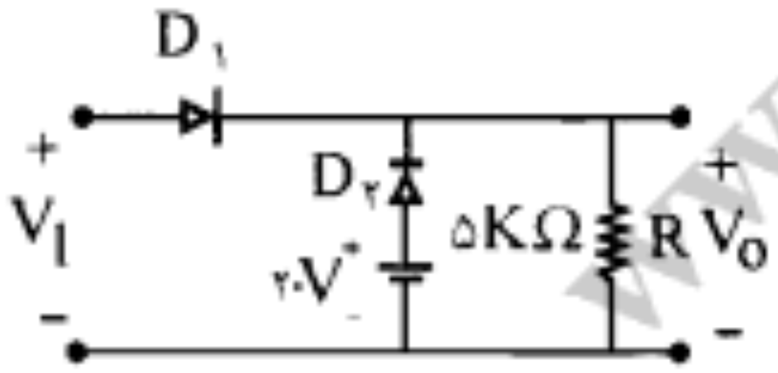


۲۸ ـ در مدار برش شکل م ـ ۲۸، برای دیودهای مدار $R_f = 20\Omega$، $R_r = \infty$ و $V_\gamma = 0$ است.

الف) مشخصه انتقالی را رسم نمایید. نشان دهید که مدار دارای یک نقطه شکست گسترش یافته (دو نقطه شکست نزدیک به هم) است.

ب) با فرض تعویض دیود D_2 با یک مقاومت $5K\Omega$، مشخصه انتقالی را به دست آورید.

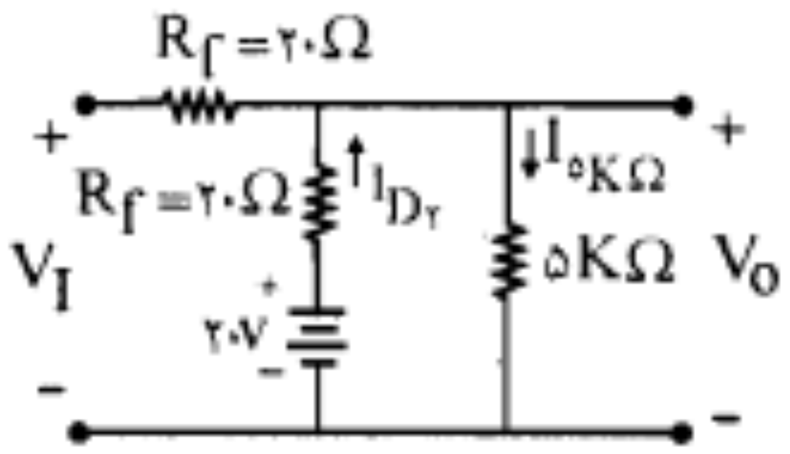
ج) نشان دهید در صورتی که R_f دیود خیلی کوچکتر از R باشد، دو نقطه شکست بند (الف) به یک نقطه شکست بند (ب) تبدیل می‌شود.



شکل م-۲۸

☑ **راه حل:**

الف) فرض می‌کنیم D_1 و D_2 روشن باشند در این صورت داریم:



$$V_O\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_f}\right) = \frac{V_I}{R_f} + \frac{20}{R_f} \Rightarrow V_O(2R + R_f) = R_{V_I} + 20R \Rightarrow V_O = \frac{R}{2R + R_f} V_I + \frac{20R}{2R + R_f}$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow V_O = \frac{5000}{10020} V_I + \frac{20 \times 5000}{10020} \Rightarrow V_O = 0/499\ V_I + 9/98 \quad (I)$$

شرط روشن بودن D_2 به صورت مقابل می‌باشد:

$$I_{D_2} = \frac{20 - V_O}{20} > 0 \Rightarrow 20 - \frac{R}{2R+R_f} V_I - \frac{20R}{2R+R_f} > 0 \Rightarrow 20 \times 2R + 20 \times R_f - RV_I - 20R > 0$$

$$\Rightarrow V_I < 20 + \frac{20R_f}{R} \Rightarrow V_I < 20/08$$

شرط روشن بودن D_1 به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{D_1} = -I_{D_2} + I_{5K\Omega} = -\frac{20 - V_O}{R_f} + \frac{V_O}{R} > 0 \Rightarrow V_O(R+R_f) - 20R > 0 \Rightarrow V_O > \frac{20R}{R+R_f}$$

با جایگزینی $V_{\cdot}$ داریم

$$\frac{R}{2R+R_f} V_I + \frac{20R}{2R+R_f} > \frac{20R}{R+R_f} \Rightarrow V_I(R+R_f) + 20(R+R_f) > 20(2R+R_f)$$

$$\Rightarrow V_I > \frac{20R}{R+R_f} \Rightarrow V_I > \frac{20 \times 5000}{5000+20} = 19/92$$

بخش مشترک دو شرط بالا به صورت مقابل می‌باشد:

$$19/92 < V_I < 20/08$$

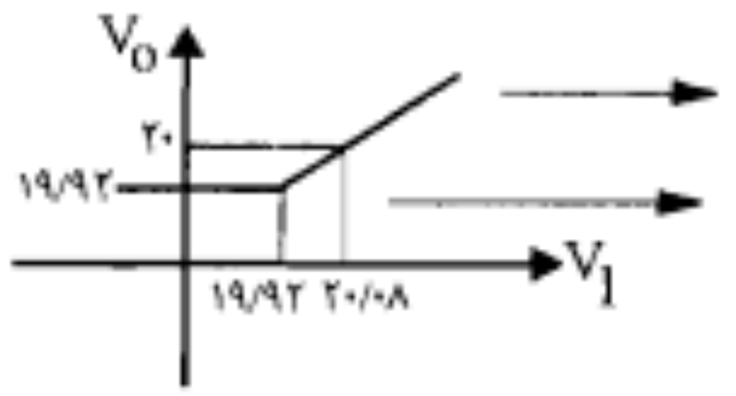
$$\Rightarrow 19/92 < V_I < 20/08 \ , \ V_O = 0/499 V_I + 9/98 \quad \begin{cases} D_1 : ON \\ D_2 : ON \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 20/08$ باشد D_2، off می‌شود و D_1، ON می‌ماند.

$$V_I > 20/08 \Rightarrow V_O = V_I \times \frac{5}{5/02} = 0/996\ V_I \quad \begin{cases} D_1 : ON \\ D_2 : Off \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 19/92$، D_1 off، می‌شود و D_2 می‌ماند.

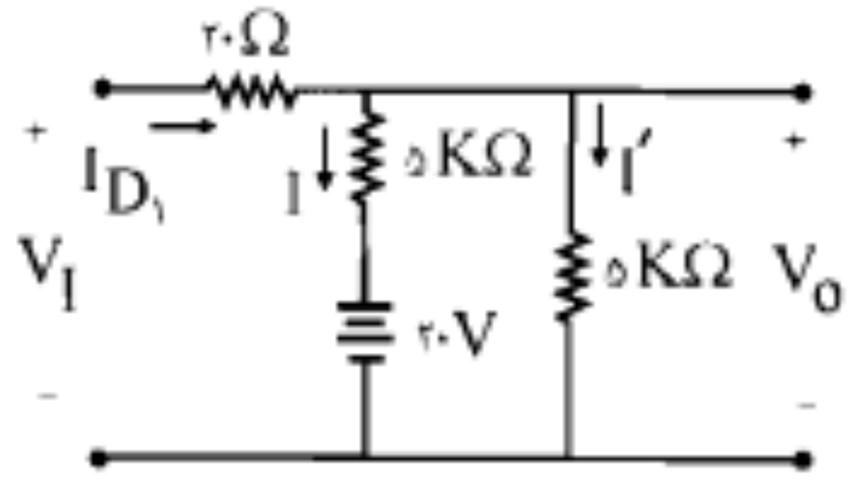
$$V_I < 19/92 \Rightarrow V_O = V_I \times \frac{5}{5/02} = 19/92 \quad \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : ON \end{cases}$$



$\longrightarrow V_O = 0/996\ V_I$

$\longrightarrow V_O = 0/499\ V_I + 9/98$

ب) حال اگر در مدار به جای دیود D_2 مقاومت $5K\Omega$ قرار دهیم مدار به صورت زیر درمی‌آید:



برای اینکه D_1 روشن باشد باید داشته باشیم:

$$V_{A_1} > V_{K_1} \Rightarrow \begin{cases} V_{K_1} = 20 \times \frac{5}{5+5} = 10\ V \\ V_{A_1} = V_I \end{cases} \Rightarrow V_I > 10\ V$$

(ولتاژ کاتد < ولتاژ آند)

$$V_O = \left(\frac{1}{5000} + \frac{1}{5000} + \frac{1}{20}\right) = \frac{V_I}{20} + \frac{20}{5000} \Rightarrow V_O = \frac{250}{252} V_I + \frac{20}{252}$$

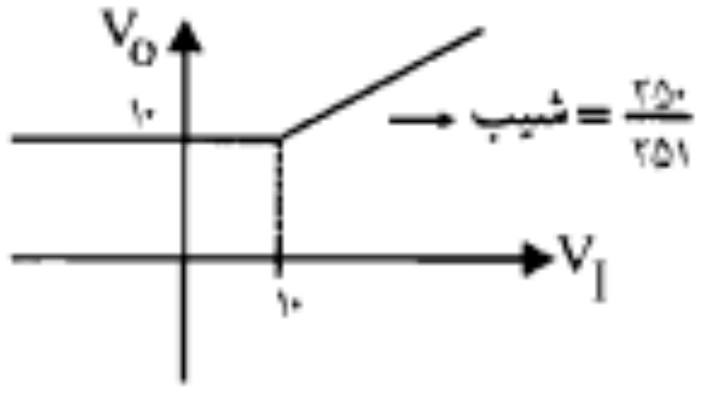
$$\text{پس}: D_1 : ON \Rightarrow \begin{cases} V_I > 10^V \\ V_0 = \frac{250}{252} V_I + \frac{20}{252} \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 10\ V$ شود D_1 خاموش می‌شود و V_O به صورت مقابل به دست می‌آید:

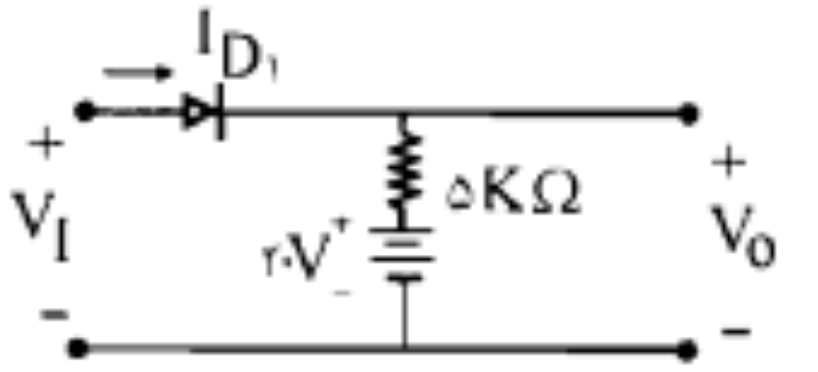
$$V_O = 20 \times \frac{5}{5+5} = 10^V$$

$$\Rightarrow D_1 : Off \Rightarrow \begin{cases} V_I < 10^V \\ V_O = 10^V \end{cases}$$

مشخصه انتقالی به صورت زیر می‌باشد:



ج) با کوچک بودن مقاومت R_f دو نقطه شکست نزدیک به هم، بسیار نزدیک‌تر به هم می‌شوند و تبدیل به یک نقطه شکست در $V_I = 20^V$ می‌گردند در قسمت ب صورت مسأله باید به این صورت تصحیح شود که به جای مقاومت $5K\Omega$ و دیود D_2 یک مقاومت $5K\Omega$ در مدار قرار می‌دهیم یعنی مدار به صورت زیر در می‌آید:



www.*.PnuEB.*.com

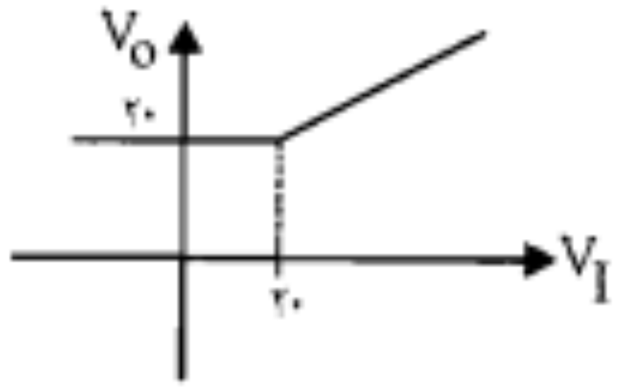
حال شرط ON بودن D_1 به صورت مقابل می‌باشد $I_{D_1}=\frac{V_I-۲۰}{۵}>۰\Rightarrow V_I>۲۰^V$

$$\Rightarrow D_1:ON\Rightarrow\begin{cases}V_I>۲۰^V\\ V_O=V_I\end{cases}$$

و اگر $V_I<۲۰^V$ شود D_1 خاموش می‌شود و $V_O=۲۰^V$ می‌شود.

$$D_1:Off\Rightarrow\begin{cases}V_I<۲۰^V\\ V_O=۲۰^V\end{cases}$$

و مشخصه انتقالی به صورت زیر می‌باشد:

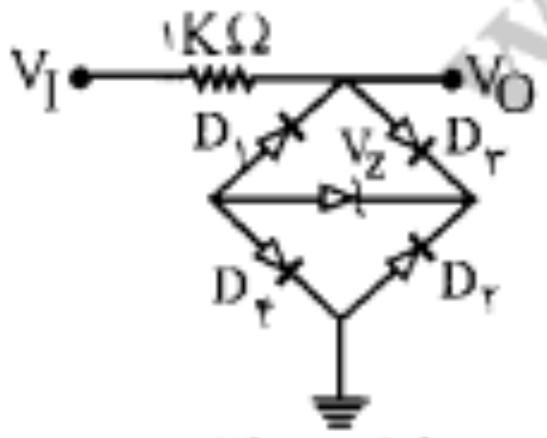


حال بند (ج) می‌تواند چنین بیان شود که با توجه به بند (الف) شکست چنین پیدا شده بودند.

$$V_I<۲۰+\frac{۲۰R_f}{R}=۲۰/۰۸ \quad و \quad V_I>\frac{۲۰R}{R+R_f}=۱۹/۹۲$$

و با کوچک بودن R_f این دو نقطه به سوی $V_I=۲۰$ میل می‌نمایند و دو نقطه شکست به یک نقطه شکست در $V_I=۲۰$ تبدیل می‌گردد.

۲۹ ـ در مدار شکل م ـ ۲۹ با فرض $V_\gamma=۰/۷V$ ، $R_f=۰$ ، $R_r=\infty$ و $V_z=۹/۲V$ ، مشخصه انتقالی را برای $-۲۰V\le V_I\le ۲۰V$ رسم کنید.



شکل م-۲۹

راه حل:

اگر D_3 و D_4 روشن و D_1 و D_2 خاموش باشند و D_Z در حالت شکست باشد داریم:

$$V_O=V_Z+V_\gamma+V_\gamma=۸/۲+۰/۷+۰/۷=۹/۶$$

شرط روشن بودن D_3 و D_4: $I_{D_3}=I_{D_4}=I_{D_z}=\frac{V_I-V_\gamma-V_\gamma-V_Z}{۱}>۰=\frac{V_I-۹/۶}{۱}>۰$

$$\Rightarrow\begin{cases}V_I>۹/۶^V\\ V_۰=۹/۶\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}D_1,D_2:Off\\ D_3,D_4:ON\end{cases}$$

اگر D_3 و D_4 خاموش و D_1 و D_2 روشن باشند و D_Z در حالت شکست باشد.

$$V_O=-V_\gamma-V_\gamma-V_Z=-۹/۶$$

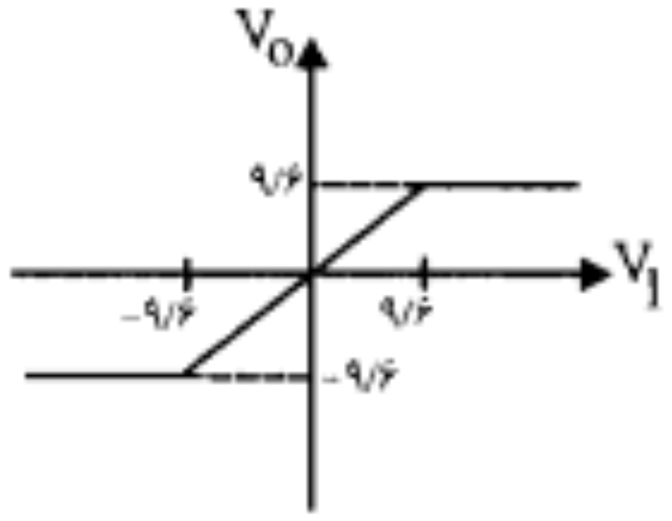
شرط روشن بودن D_1 و D_2: $I_{D_1}=I_{D_2}=I_{D_z}=\frac{-V_I-V_\gamma-V_\gamma-V_Z}{۱}>۰\Rightarrow V_I<-۹/۶$

$$\Rightarrow\begin{cases}V_I<-۹/۶\\ V_O=-۹/۶\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}D_1,D_2:ON\\ D_3,D_4:Off\end{cases}$$

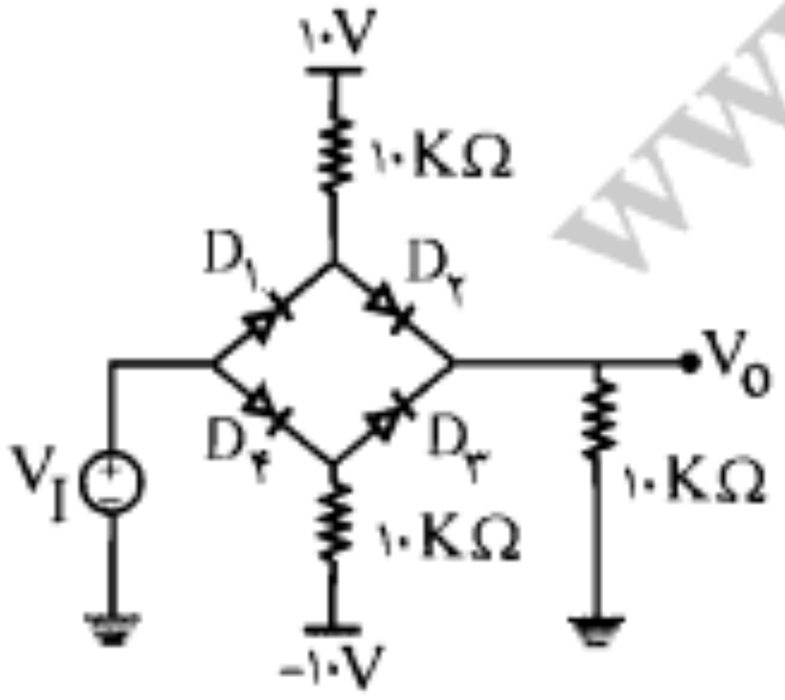
و در حالت $-۹/۶<V_I<۹/۶$ همه دیودها قطع و D_Z نیز در حالت بایاس معکوس می‌باشد لذا در این حالت داریم: $V_O=V_I$

$$V_O=V_I\Rightarrow D_1,D_2,D_3,D_4:Off$$

مشخصه به صورت زیر می‌شود:



۳۰ ـ در مدار شکل م ـ ۳۰ با فرض ایده‌آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی مدار را به دست آورید.



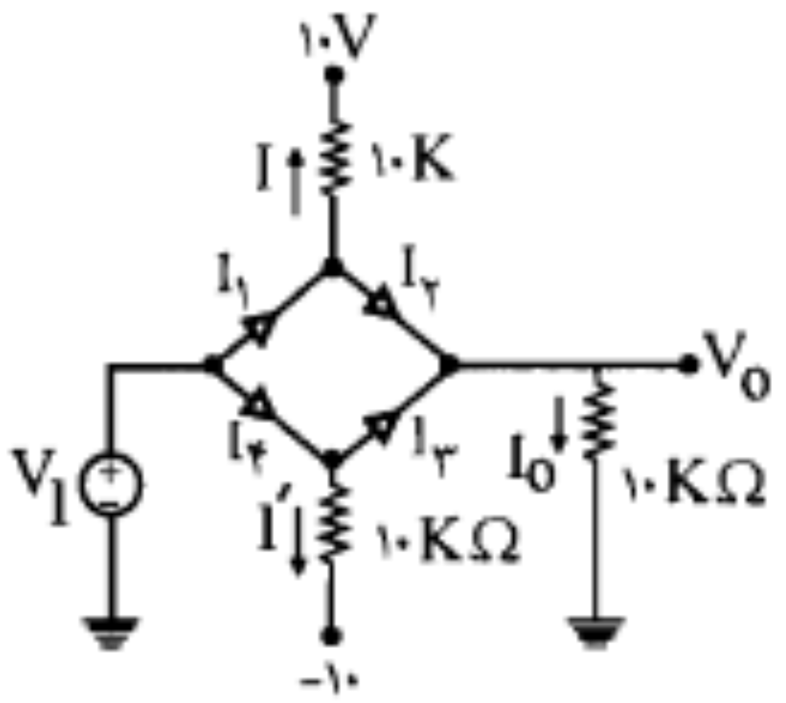
شکل م-۳۰

راه حل:

ابتدا فرض می‌کنیم همه دیودها روشن باشند.

با این فرض مدار مطابق شکل زیر خواهد شد.

در این حالت واضح است که $V_O=V_i$ حالا جهت بررسی شرایط روشن بودن دیودهای D_1 الی D_4 باید I_1 ، I_2 ، I_3 و I_4 مشخص شده برحسب، V حساب شوند و باید



www.PnuEB.com

همگی مثبت باشند. برای این منظور داریم:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{V_i - 10}{10^K} \quad (1) \qquad I' = I_4 - I_3 = \frac{V_i + 10}{10^K} \quad (2)$$

$$I_2 + I_3 = I_o = \frac{V_i}{10^K} \quad (3) \qquad I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \quad (4)$$

با حل چهار معادله فوق خواهیم داشت:

$$I_1 = \frac{3V_i - 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > \frac{10}{3}$$

$$I_2 = \frac{V_i + 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > -10$$

$$I_3 = \frac{V_i - 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > 10$$

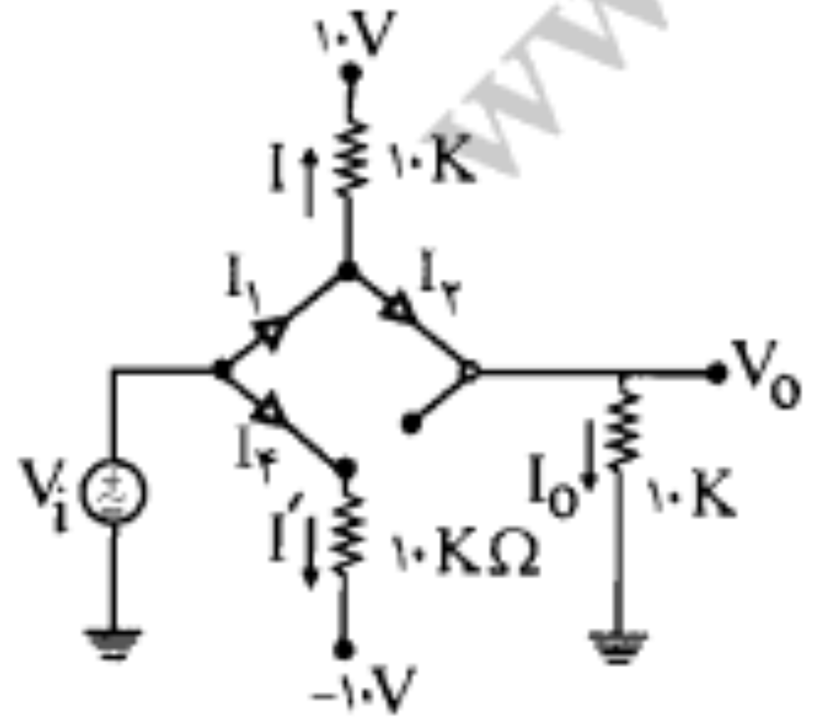
$$I_4 = \frac{3V_i + 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > -\frac{10}{3}$$

اشتراک چهار شرط فوق $V_i > 10$ است.

بنابراین داریم:

$$V_i > 10\,V \Rightarrow V_O = V_i \quad , \quad D_1, D_2, D_3, D_4 : ON$$

اگر $V_i < 10^V$ باشد واضح است که D_3، off است و مدار به صورت شکل زیر خواهد شد:



باز خواهیم داشت $V_O = V_i$ و داریم:

$$I_4 = \frac{V_i - (-10)}{10^K} = \frac{V_i + 10}{10} > 0 \Rightarrow V_i > -10 \quad (5)$$

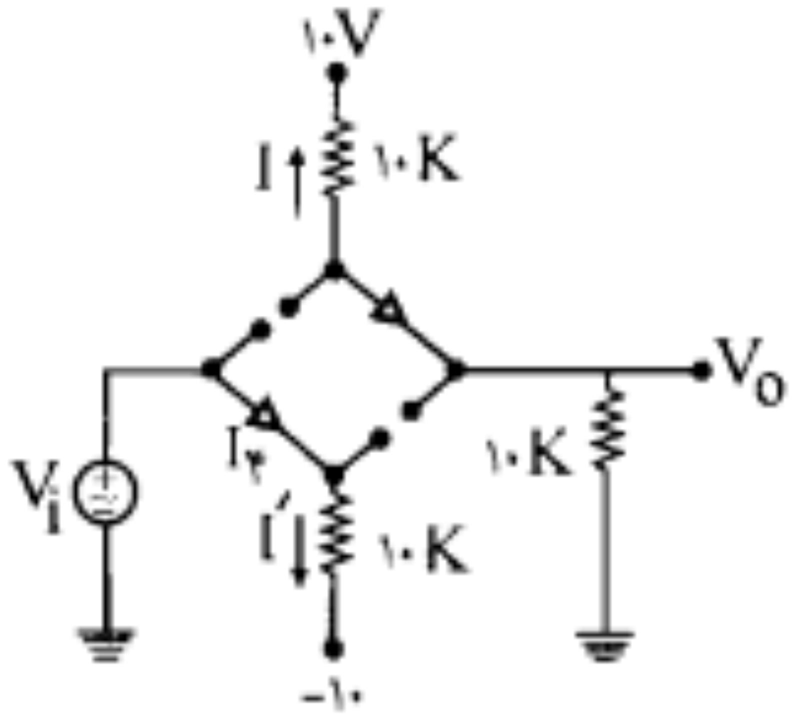
$$I_2 = \frac{V_i}{10} > 0 \Rightarrow V_i > 0 \quad (6)$$

$$I_1 = I + I_2 = \frac{V_i - 10}{10} + \frac{V_i}{10} > 0 \Rightarrow V_i > 5 \quad (7)$$

بنابراین اشتراک شروط (۵)، (۶) و (۷) به صورت $V_i > 5$ خواهد شد. خواهیم داشت:

$$5 < V_i < 10 \Rightarrow V_O = V_i \text{ و } D_1, D_2, D_4 : ON \ , \ D_3 : Off$$

برای $V_i < 5$ باشد با توجه به شرط (۷)، D_1، off می‌شود و مدار به شکل زیر خواهد شد.



$$V_O = 10 \times \frac{10}{10 + 10} = 5^V$$

شرط on بودن D_2: $I_2 = \frac{10}{20^K} > 0$

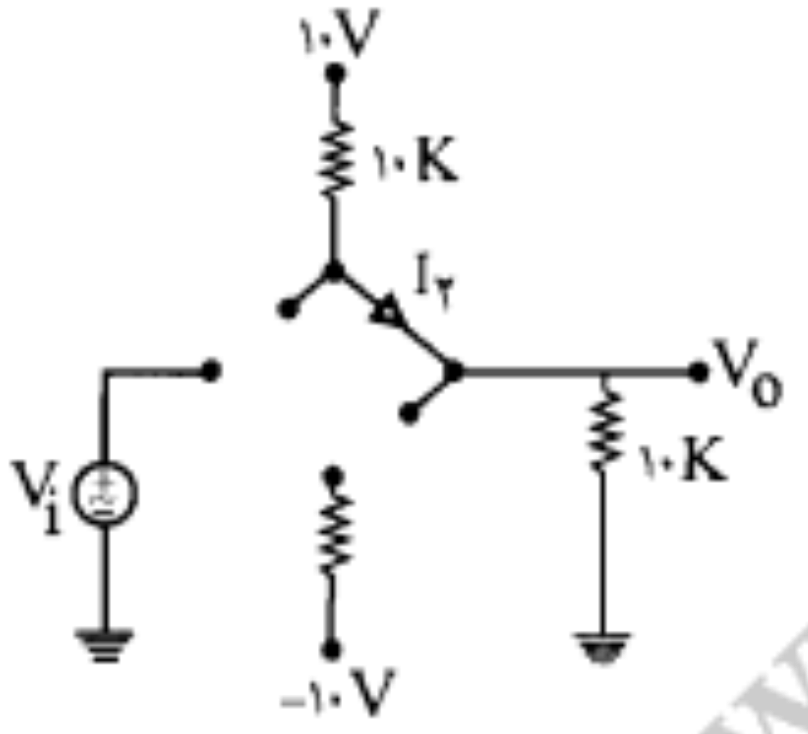
برای on بودن D_4 خواهیم داشت:

$$I_4 = \frac{V_i - (-10)}{10^K} > 0 \Rightarrow V_i > -10 \quad (8)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$-10 < V_i < 5 \Rightarrow V_O = 5 \ , \ D_1, D_3 : off \quad , \quad D_2, D_4 : on$$

اگر $V_i < -10$ باشد. با توجه به رابطه (۸)، D_4، off خواهد بود و مدار چنین می‌شود.



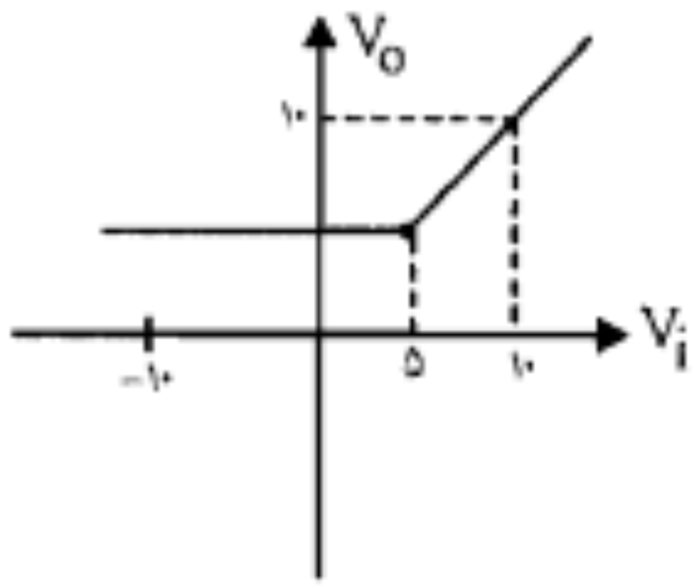
$$V_O = \frac{10}{20\,K} \times 10^K = 5V$$

شرط on بودن D_2: $I_2 = \frac{10 - 0}{20^K} > 0$

بنابراین خواهیم داشت:

$$V_i < -10 \Rightarrow V_O = 5 \Rightarrow D_1, D_3, D_4 : off \ , \ D_2 : on$$

بنابراین مشخصه انتقال مدار مورد بحث به‌صورت شکل زیر خواهد شد:



۳۱ ـ یک مدار یکسوکننده تمام موج دارای دامنه ولتاژ حداکثر برابر ۱۰۰ ولت است. به این مدار یک صافی خازنی اضافه می‌کنیم. در صورتی که $R_L = 1K\Omega$ و فرکانس برق شهر ۵۰ HZ باشد؛ در هر یک از حالت‌های زیر ضریب ریپل (r.f.) که به صورت زیر تعریف می‌شود و جریان حداکثر دیود را محاسبه کنید.

الف) $C = 10\mu f$

ب) $C = 100\mu f$

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

ضریب ریپل به صورت نسبت درصد ولتاژ DC خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\%r.f.=\frac{V_r(rms)}{V_{dc}}\times ۱۰۰$$

برای V_r (rms) از نتایج مسأله ۳ـ۳۵ استفاده کنید.

$$V_{dc}=\frac{۲V_m}{\pi}=\frac{۲\times ۱۰۰}{\pi}=۶۳/۶۶V$$

$$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R_L}=\frac{۶۳/۶۶\ V}{۱K\Omega}=۶۳/۶۶\ mA$$

$$V_r(dc)=\frac{I_{dc}}{۲fc}$$

الف: $C=۱۰\mu f \rightarrow V_r(dc)=\frac{۶۳/۶۶^{mA}}{۲\times ۵۰\times ۱۰\mu f}=۶۳/۶۶^{V}$

ب: $C=۱۰۰۰\mu f \rightarrow V_r dc=۶۳.۶۶\times ۱۰^{-۲}V$

$$V_r(rms)=\frac{V_r(dc)}{۲\sqrt{۳}}$$

الف: $C=۱۰\mu f \rightarrow V_r(rms)=۱۸/۳۷\ V$

ب: $C=۱۰۰۰\mu f \rightarrow V_r(rms)=۰/۱۸۳۷\ V$

$$\%r.f=\frac{V_r(rms)}{V_{dc}}\times ۱۰۰$$

الف: $C=۱۰\mu f \rightarrow \%r.f.=\frac{۱۸/۳۷}{۶۳/۶۶}\times ۱۰۰=۲۸/۸۶\%$

ب: $C=۱۰۰۰\mu f \rightarrow \%r.f=\frac{۰/۱۸۳۷}{۶۳/۶۶}\times ۱۰۰=۰/۲۸۸۶\%$

$$I_m=V_m\sqrt{\omega^۲C^۲+\frac{۱}{R_L^۲}}$$ رابطه (۳ـ۳۲) صفحه ۸۳

$I_m=$

الف: $C=۱۰\mu f \rightarrow I_m=۱۰۰\sqrt{(۲\pi\times ۵۰)^۲\times ۱۰\mu f^۲+\frac{۱}{۱^۲}}=۳۲/۹mA$

ب: $C=۱۰۰۰\mu f \rightarrow I_m=۱۰۰\sqrt{(۲\times\pi\times ۵۰)^۲\times ۱۰۰۰\mu^۲ f+\frac{۱}{۱^۲}}=۳۱/۴$

۳۲ـ با استفاده از تعریف بازده (η) در یکسوکننده‌ها نشان دهید که

الف) برای مدار یکسوکننده نیم موج رابطه زیر برقرار است:

$$\eta=\frac{۴۰/۵}{۱+\frac{R_f}{R_L}}$$

ب) برای مدار یکسوکننده تمام موج مقدار η دو برابر مقدار فوق است.

☑ **راه حل:**

الف) $\eta=\frac{(P_{out})dc}{(P_{in})av}$ رابطه (۳ـ۲۰) صفحه ۷۶

$$P_{in}(av)=\frac{V_m^۲}{۴(R_f+R_L)} \Rightarrow \eta=\frac{\frac{V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}}{\frac{V_m^۲}{۴(R_f+R_L)}}=\frac{V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}\times\frac{۴(R_f+R_L)}{V_m^۲}$$

$$P_{out}(dc)=\frac{V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}$$

$$\rightarrow \%\eta=\frac{۴R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)}\times ۱۰۰=\frac{۴۰/۵}{\frac{R_f+R_L}{R_L}}=\frac{۴۰/۵}{۱+\frac{R_f}{R_L}}\%$$

ب) در یکسوکننده تمام موج مقدار $(P_{in})av$ و $(P_{out})_{dc}$ به صورت زیر است:

$$(P_{in})av=\frac{V_m^۲}{۲(R_f+R_L)}$$

$$(P_{out})dc=\frac{۴V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}$$

$$\rightarrow \eta\%=\frac{\frac{۴V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}}{\frac{V_m^۲}{۲(R_f+R_L)}}\times ۱۰۰$$

$$\eta\%=\frac{۴V_m^۲R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)^۲}\times\frac{۲(R_f+R_L)}{V_m^۲}=\frac{۸R_L}{\pi^۲(R_f+R_L)}=\frac{۸۱}{۱+\frac{R_f}{R_L}}\times ۱۰۰$$

می‌بینیم که مقدار بازده در حالت دوم دو برابر حالت اول می‌باشد.

۳۳ـ یک مدار یکسوکننده تمام موج غیر پل با صافی خازن و $C=۴۰\mu f$ و $R_L=۵K\Omega$ را در نظر بگیرید. در صورتی که ولتاژ بین هر یک از سرهای ثانویه و زمین به صورت $V_I=V_m\sin ۲\pi ۵۰t$ با

$V_m = ۱۰۰\ V$ باشد.

الف) $V_{L,dc}$ و ولتاژ ریپل V_r خروجی را محاسبه کنید.

ب) با فرض $V_\gamma = ۰/۶\ V$، آیا مقادیر فوق به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر خواهند کرد؟

ج) دیودهای به‌کار رفته در این مدار چه جریان حداکثر و چه ولتاژ معکوس حداکثری را باید بتوانند تحمل کنند؟

☑ **راه حل:**

الف) با توجه به رابطه (۳ـ۴۱) کتاب داریم:

$$V_{dc} = V_m - \frac{Idc}{۴fc} = V_m - \frac{Vdc}{R_L \times ۴fc} = ۱۰۰ - \frac{Vdc}{۵۰۰۰ \times ۴ \times ۵۰ \times ۴۰ \times ۱۰^{-۶}}$$

$$\rightarrow Vdc = ۱۰۰ - \frac{Vdc}{۴۰} \rightarrow ۴۰\ Vdc = ۴۰ \times ۱۰۰ - Vdc \rightarrow Vdc = ۹۷/۵۶\ V$$

$$V_r = \frac{Vdc}{۲fCR} = \frac{۹۷/۵۶\ V}{۲ \times ۵^{K\Omega} \times ۵۰ \times ۴۰ \times ۱۰^{-۶}} = ۴/۸۷\ V$$

ب) در این صورت $V_m = ۱۰۰ - ۰/۶$ خواهد شد.

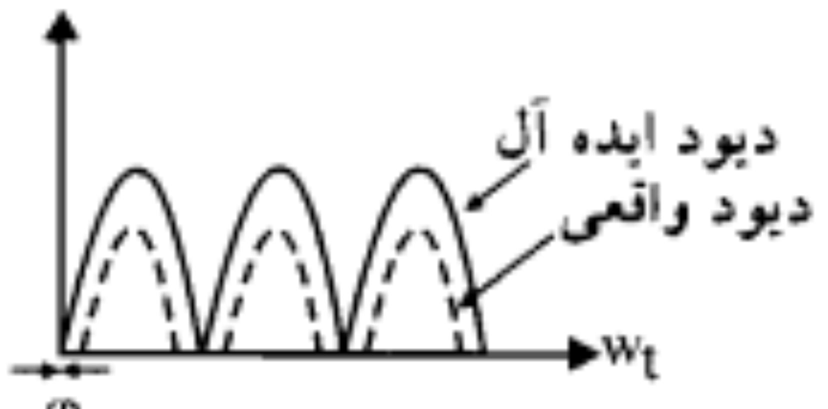
$$Vdc = (۱۰۰ - ۰/۶) - \frac{Vdc}{۴۰} \rightarrow Vdc = ۹۶/۹V^V$$

$$V_r = \frac{Vdc}{۲fcR_L} = \frac{۹۶.۹۷V}{۲ \times ۵۰ \times ۴۰ \times ۱۰^{-۶} \times ۵^{K\Omega}} = ۴/۸۴\ V$$

ج) حداکثر ولتاژ معکوس $= ۲V_m = ۲۰۰\ V$

$$I_m = V_m \sqrt{\omega^۲ C^۲ + \frac{۱}{R_L^۲}} = ۱/۲۶\ A$$

۳۴ـ در شکل م ـ ۳۴، خروجی یکسوکننده تمام موج برای دو حالت دیود ایده‌آل و واقعی رسم شده است. مقدار تأخیر φ را بر حسب دامنه ورودی سینوس (V_m) و ولتاژ آستانه هدایت (V_γ) دیود بیان نمایید. آیا φ برای یکسوکننده پل متفاوت خواهد بود؟ چرا؟



شکل م-۳۴

☑ **راه حل:**

تأخیر فاز φ به دلیل ایده‌آل نبودن دیود می‌باشد.

$$V(t) = V_m \sin \omega t$$

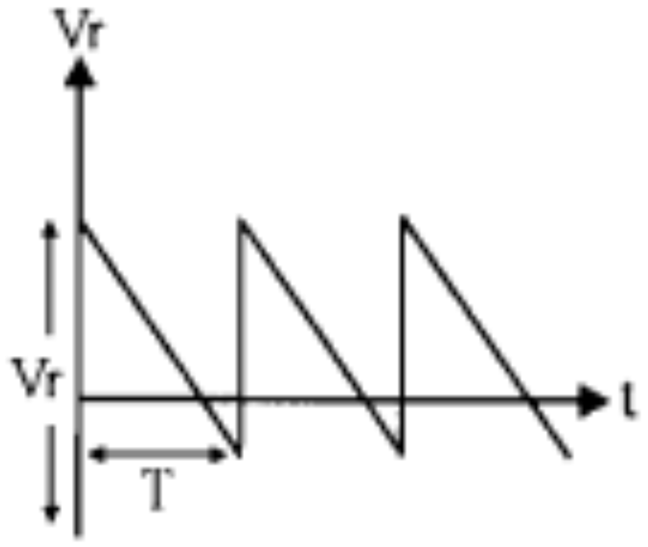
$$V_O(t) = \begin{cases} |V_i(t)| - V_\gamma & , \quad |V_i(t)| \geq V_\gamma \\ ۰ & , \quad |V_i(t)| < V_\gamma \end{cases}$$

$$V_m \sin \omega t = V_m \sin\varphi = V_\gamma \Rightarrow \psi = \sin^{-۱}(\frac{V_\gamma}{V_m})$$

مقدار φ برای یکسوکننده پل متفاوت خواهد بود زیرا V_γ در یکسوکننده تمام موج برابر $V_\gamma = ۰/۷\ V$ و برای یکسوکننده تمام موج پل $V_\gamma = ۱/۴\ V$ می‌باشد.

$V_m \sin \omega t = ۲V_\gamma = ۲V_\gamma \Rightarrow \varphi = \sin^{-۱}(\frac{۲V_\gamma}{V_m})$ در یکسوکننده تمام موج پل

۳۵ـ ریپل خروجی یک یکسوکننده با صافی خازنی را می‌توان با منحنی شکل م ـ ۳۵ تقریب زد. مقدار مؤثر ولتاژ ریپل V_r (rms) را بر حسب V_r به‌دست آورید.



شکل م-۳۵

$$V_{rms} = \left[\frac{۱}{T}\int_۰^T (V_r^۲(t)\,dt)\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

معادله تغییرات V_γ: $V_r(t) = \frac{-V_r(P-P)}{T} t + \frac{V_r(P-P)}{۲} \quad ۰ \leq t \leq T$

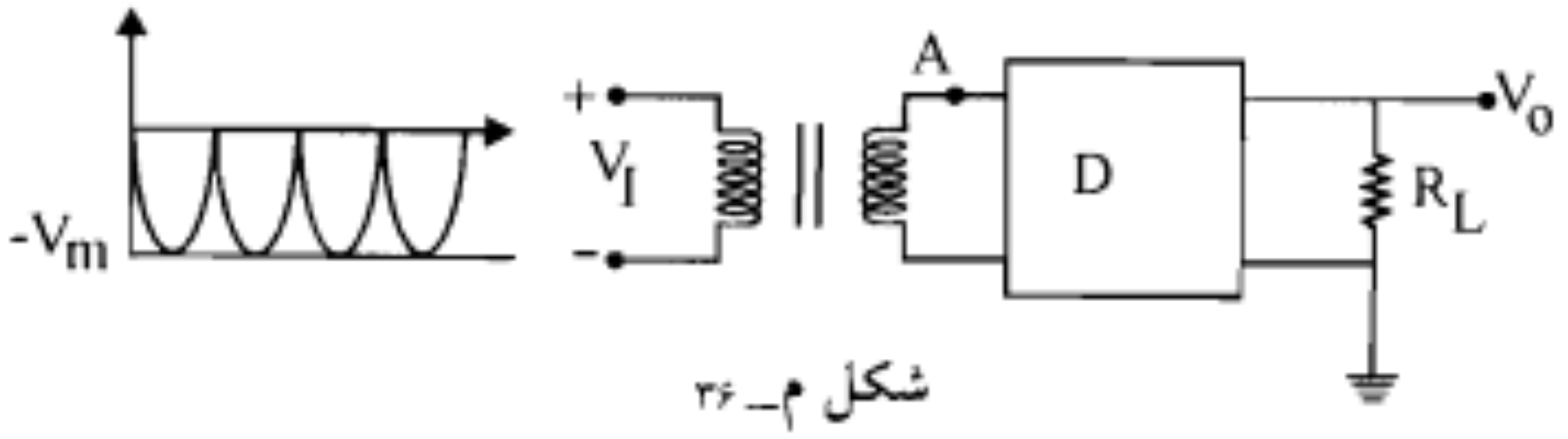
$$V_O^۲(rms) = \frac{۱}{T}\int_۰^T \left[\frac{-V_r(P-P)}{T} t + \frac{V_r(P-P)}{۲}\right]^۲ dt$$

$$= \frac{V_r^۲(P-P)}{T}\int_۰^T (\frac{۱}{۴} + \frac{t^۲}{T^۲} - \frac{t}{T})\,dt = \frac{V_r^۲(P-P)}{T}\ (\frac{T}{۴} + \frac{T^۳}{۳T^۲} - \frac{T^۲}{۲T})$$

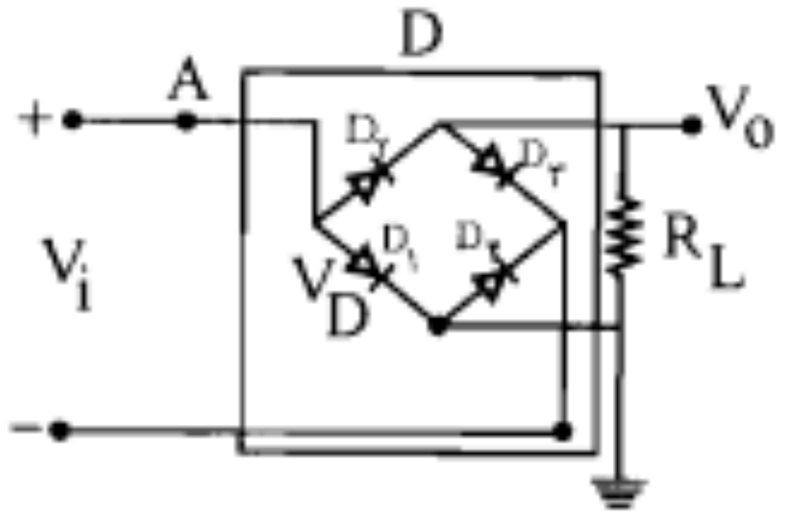
$$= \frac{V_r^۲(P-P)}{۱۲} \rightarrow V_{rms} = \frac{V_r(P-P)}{\sqrt{۱۲}} = \frac{V_r(P-P)}{۲\sqrt{۳}}$$

www.PnuEB.com

۳۶ـ در مدار شکل م ـ ۳۶، در محل جعبه D یک مدار پل دیودی مناسب طوری جایگزین کنید که به ازای یک شکل موج سینوسی ورودی با دامنه V_m، ولتاژ خروجی V_O دارای شکل موج نشان داده شده باشد شکل موج ولتاژ نقطه A نسبت به زمین چگونه خواهد بود؟ (از دیودهای ایده‌آل استفاده کنید.)



شکل م ـ ۳۶



☑ **راه حل:**

پل دیودی مناسب به صورت مقابل می‌باشد که همان پل دیود یکسو سازی است که در بخش درسی کتاب آمده است با این تفاوت که چون ولتاژ V_O خواسته شده منفی می‌باشد بنابراین دو سر دیودی که کاتد آنها به هم وصل می‌شود و مثبت ولتاژ خروجی بوده حال به زمین وصل می‌شود و سر دیگر مدار خروجی می‌باشد.

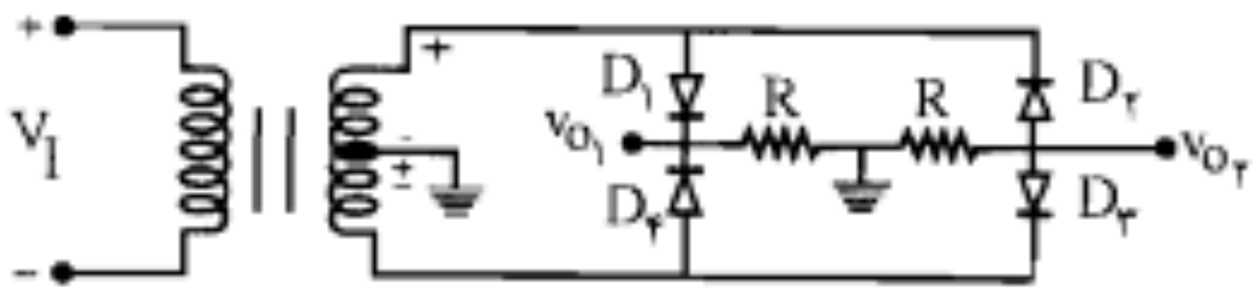
ولتاژ نقطه A نسبت به زمین $V_A = V_D$ خواهد شد که همان ولتاژ دو سردیود D_1 می‌باشد که وقتی دیود D_1 روشن باشد برابر V_γ و وقتی D_1 خاموش باشد برابر $V_L + V_\gamma$ یا $V_m \sin \omega t + V_\gamma$ خواهد شد.

۳۷ـ در مدار شکل م ـ ۳۷، ولتاژ آستانه هدایت دیودها را صفر و مقاومت مستقیم آنها را R_f در نظر بگیرید. اگر V_I یک ولتاژ سینوسی باشد.

الف) شکل موج ولتاژهای خروجی V_{O_1} و V_{O_2} را رسم کنید.

ب) مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژهای V_{O_1} و V_{O_2} را محاسبه کنید.

ج) حداکثر ولتاژ معکوس که روی هر یک از دیودها قرار می‌گیرد، دقیقاً چقدر است؟

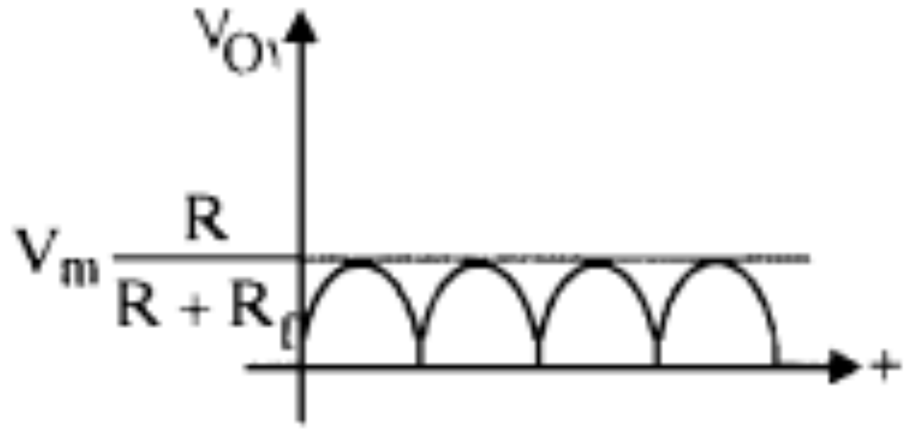


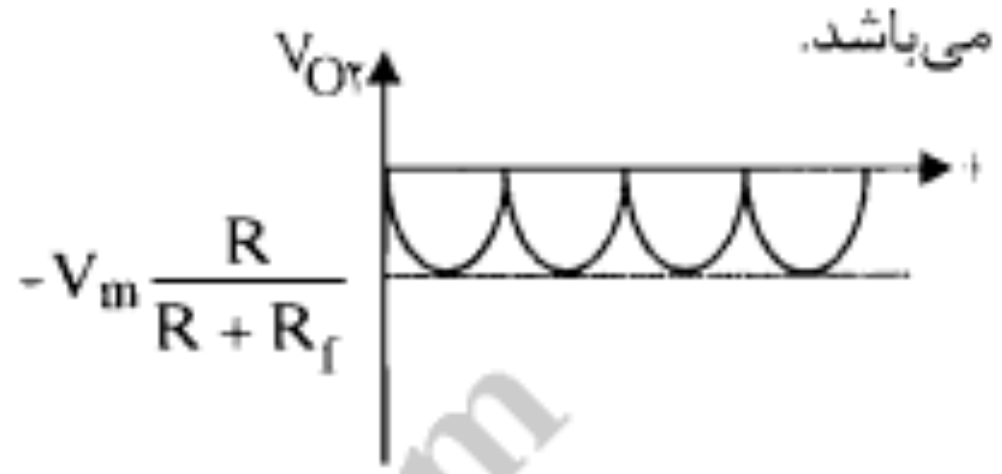
شکل م-۳۷

☑ **راه حل:**

در نیم سیکل مثبت D_1 و D_3، ON و D_2 و D_4، off می‌باشند و در نیم سیکل منفی D_2 و D_4، ON و D_1 و D_3، off می‌باشند.

الف) پیک ولتاژی که روی هر مقاومت افت می‌کند با تقسیم ولتاژ به ترتیب $\frac{V_m R}{R+R_f}$ و $-\frac{V_m R}{R+R_f}$ می‌باشد.

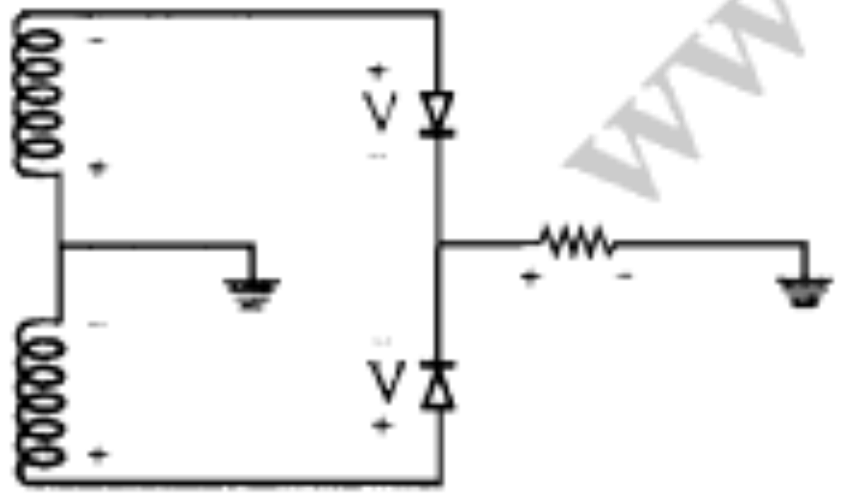




ب) مقدار متوسط ولتاژ برابر خواهد بود با: $\frac{2V_{O_1m}}{\pi}$ و $\frac{-2V_{O_1m}}{\pi}$ و مقدار مؤثر برابر است با: $\frac{V_{O_1m}}{\sqrt{2}}$ و $\frac{-V_{O_1m}}{\sqrt{2}}$

$$\begin{cases} V_{dc_1} = \dfrac{2V_m R}{\pi(R+R_f)} \\ V_{rms_1} = \dfrac{V_m R}{\sqrt{2}(R+R_f)} \end{cases} \qquad \begin{cases} V_{dc_2} = \dfrac{-2V_m R}{\pi(R+R_f)} \\ V_{rms_2} = \dfrac{-V_m R}{\sqrt{2}(R+R_f)} \end{cases}$$

ج) اگر در مسیر مشخص شده KVL بزنیم:



$$\frac{-V_m R}{R+R_f} + P_{IV} - V_m = 0$$

$$\rightarrow P_{IV} = \frac{2R+R_f}{R+R_f} V_m$$

وقتی که V_i مثبت است دیودهای D_1 و D_3 هدایت کرده و در این صورت V_{O_1} برابر $+V_m$ و V_{O_2} برابر $-V_m$ می‌شود. و وقتی که V_i منفی است دیودهای D_2 و D_4 هدایت کرده و در این صورت نیز V_{O_1} برابر $-V_m$ و V_{O_2} برابر $+V_m$ می‌شود. مقدار ولتاژ حداکثر روی هر دیود خاموش دیود می‌شود که عبارت است از:

داریم: $I_R = \frac{V_m}{R+R_f}$

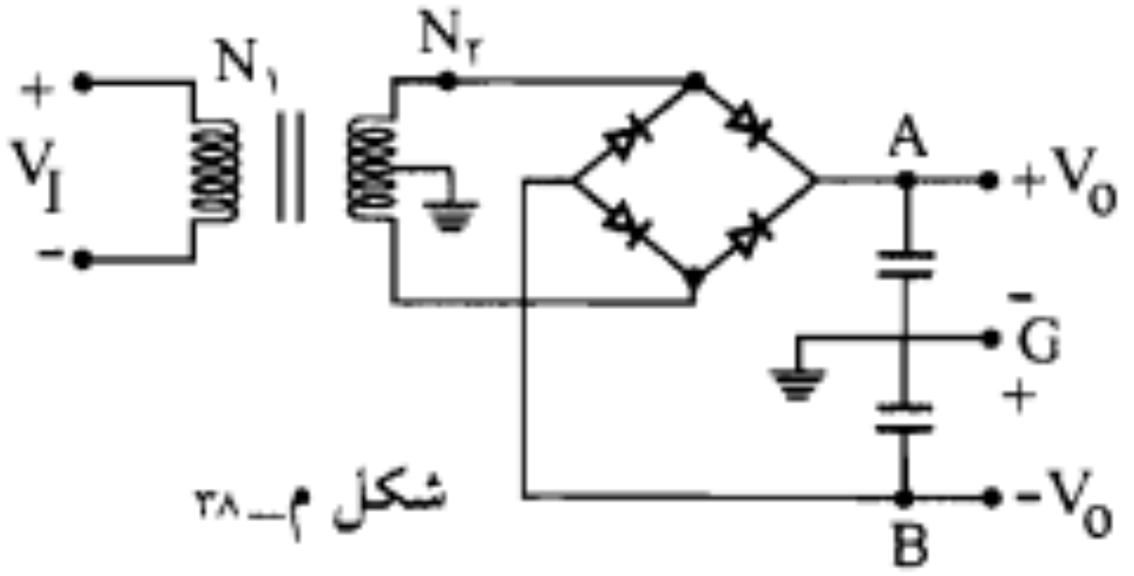
مثلاً: $V_{D_4} = V_R + V_R + V_{D_2} = 2V_R + R_f I_R$

$$\Rightarrow V_{D_4} = \frac{2RV_m}{R+R_f} + \frac{R_f V_m}{R+R_f} = \left(\frac{2R+R_f}{R+R_f}\right)V_m$$

که ولتاژ حداکثر معکوس روی یک دیود را نشان می‌دهد.

www.PnuEB.com

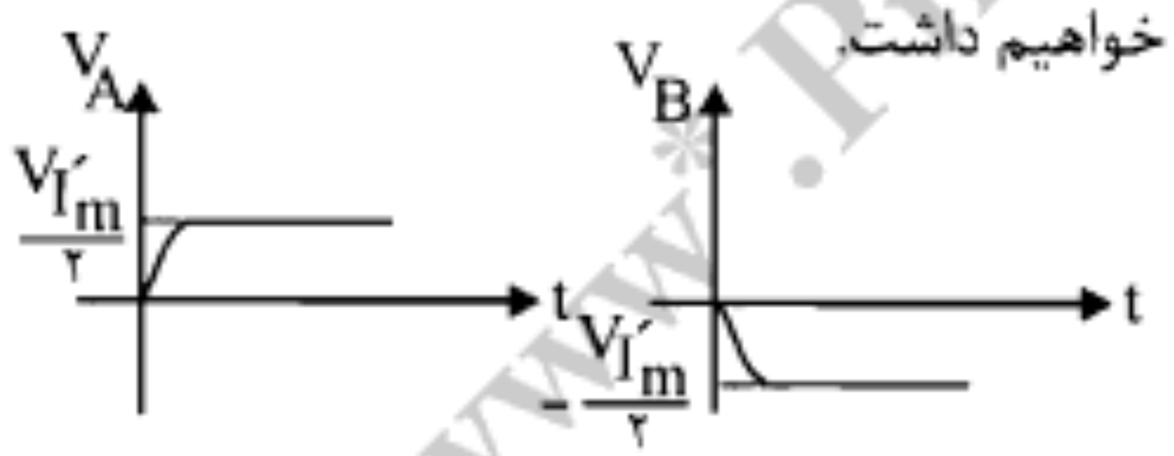
۳۸ ـ مدار شکل م ـ ۳۸ یک مدار پل با سر وسط است. طرز کار آن را توضیح دهید. در صورتی که $\frac{N_2}{N_1}=0/1$ و $V_I=100\sin\omega t$ باشد، ولتاژ خروجی را تعیین نمایید.



شکل م ـ ۳۸

☑ **راه حل:**

وقتی VI مثبت می‌باشد و دیودهای D_2 و D_4 هدایت می‌کنند و بین نقطه A و زمین ولتاژ $\frac{V'_I}{2}$ را خواهیم داشت البته با فرض ایده‌آل بودن دیود و اگر دیود ایده‌آل نباشد برابر $(\frac{V'_I}{2}-V_\gamma)$ خواهد شد و بین نقطه B و زمین ولتاژ $-\frac{V'_I}{2}$ را خواهیم داشت. (V'_I را با استفاده از تبدیل ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور به دست می‌آوریم) و وقتی V_I منفی می‌باشد دیودهای D_1 و D_3 هدایت می‌کنند و بین نقطه A و زمین ولتاژ $\frac{V'_I}{2}$ و بین نقطه B و زمین ولتاژ $\frac{-V'_I}{2}$ را خواهیم داشت.



$$\begin{cases}\frac{N_2}{N_1}=0.1\\ V_I=100\sin\omega t\end{cases}\Rightarrow\frac{V'_I}{V_I}=\frac{N_2}{N_1}\Rightarrow\frac{V'_I}{100\sin\omega t}=0.1\rightarrow V'_I=10\sin\omega t$$

$$\Rightarrow\begin{cases}V_A=\frac{V'_I}{2}=5\sin\omega t\\ V_B=-\frac{V'_I}{2}=-5\sin\omega t\end{cases}$$

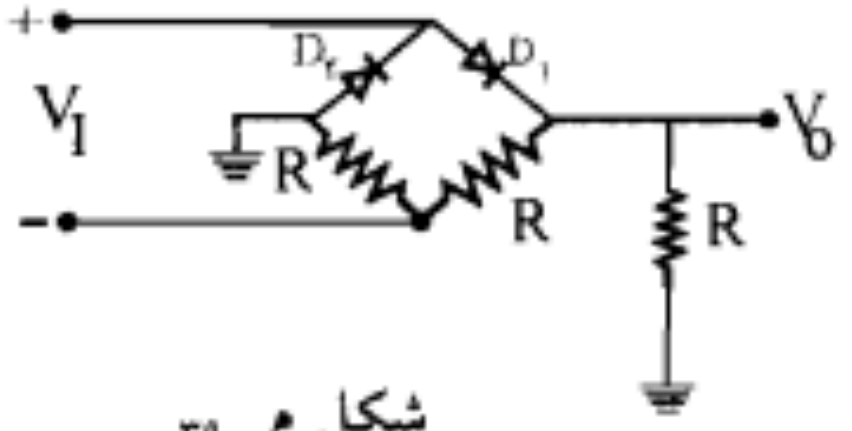
شکل موج خروجی به صورتی که نشان داده شده خواهد بود که ماکزیمم V_A، ۵ ولت که روی این مقدار ثابت باقی می‌ماند و مینیمم V_B ، $-5V$ خواهد شد که با این مقدار ثابت می‌ماند.

۳۹ ـ در مدار شکل م ـ ۳۹ دیودها ایده‌آل و $V_I=V_m\sin\omega t$ است.

الف) شکل موج ولتاژ خروجی V_O را به دست آورده و رسم کنید.

ب) مقدار DC ولتاژ خروجی را محاسبه کنید.

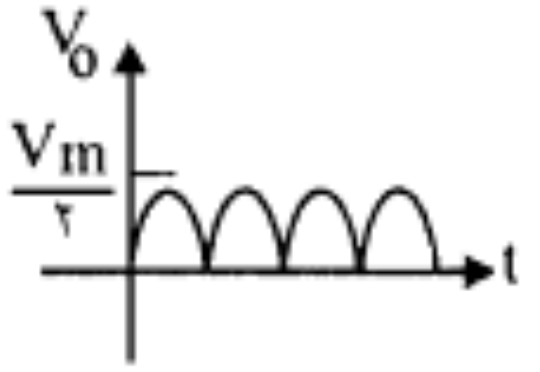
ج) مشخصه انتقالی مدار را رسم کنید.



شکل م ـ ۳۹

☑ **راه حل:**

الف) ورودی شکل موج سینوسی با دامنه V_m می‌باشد، خروجی نیز موج سینوسی یکسو شده تمام موج با دامنه $\frac{V_m}{2}$ می‌باشد.



ب) $V_O(dc)=\frac{2}{\pi}V_O(max)\quad,\quad V_O(max)=\frac{V_m}{2}$

$$\Rightarrow V_O(dc)=\frac{2}{\pi}\times\frac{V_m}{2}=\frac{V_m}{\pi}$$

ج) فرض می‌کنیم D_1 روشن و D_2 خاموش باشد در این صورت داریم:

$$V_O=V_i\times\frac{R}{R+R}=\frac{1}{2}V_i$$

$$I_{D_1}=\frac{V_i}{2R}+\frac{V_i}{R}=\frac{3V_i}{2R}$$

شرط روشن بودن دیود D_1 به صورت زیر است:

$$I_{D_1}>0\Rightarrow V_i>0$$

شرط خاموش بودن دیود D_2 به صورت زیر است:

$$V_{A_2}<V_{K_2}\Rightarrow\frac{V_i}{2}<V_i\Rightarrow V_i>0$$

در این صورت به ازای $V_1>0$ دیود D_1 روشن و دیود D_2 خاموش می‌باشد

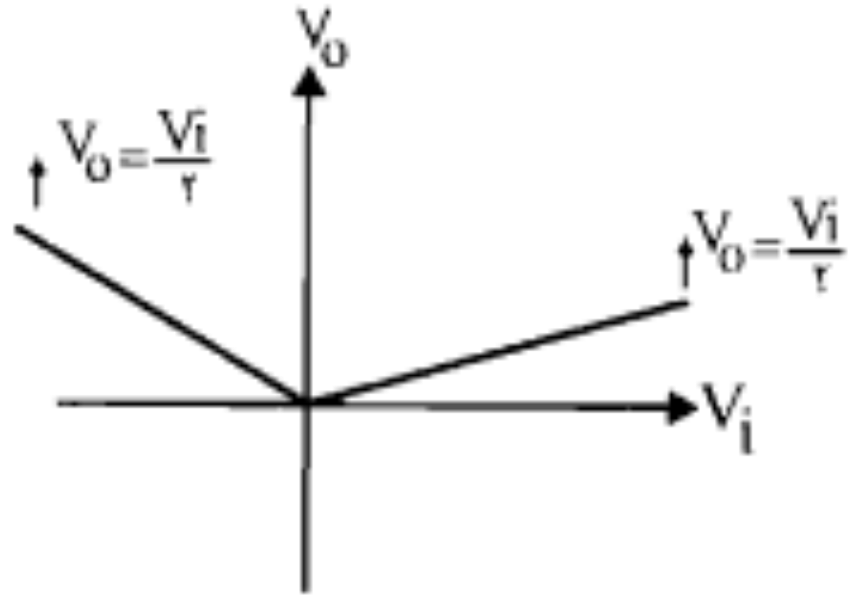
$$V_i>0\Rightarrow\begin{cases}D_1:ON\\ D_2:Off\end{cases}\Rightarrow V_O=\frac{V_i}{2}$$

www.PnuEB.com

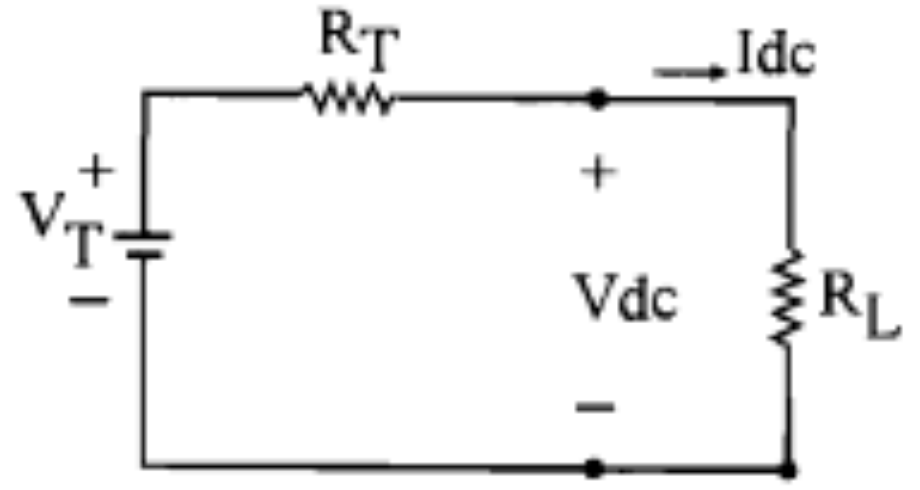
و اگر $V_i < 0$ شود در این صورت D_3 خاموش و D_2 روشن می‌شود:

$$V_O = -V_i \times \frac{R}{R+R} = -\frac{V_i}{2}$$

$$\Rightarrow V_i < 0 \Rightarrow \begin{cases} D_1 : Off \\ D_2 : ON \end{cases} \Rightarrow V_O = \frac{-V_i}{2}$$



۴۰ـ با استفاده از رابطه ۳ـ ۴۱ و مدار شکل ۳ـ ۳۰ معادل تونن یکسوکننده تمام موج با فیلتر خازنی را به دست آورید.



☑ **راه حل:**

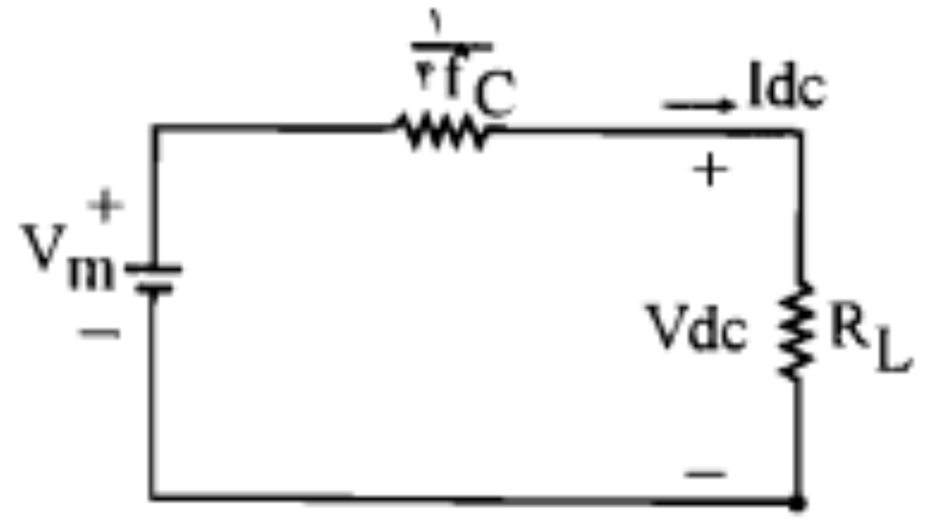
$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC}$ رابطه ۳ـ ۴۱ کتاب (I)

با توجه به مدار $\Rightarrow V_{dc} = V_T - R_T I_{dc}$ (II)

با مقایسه این دو رابطه داریم:

$$\begin{cases} V_T = V_m \\ R_T = \frac{1}{4fC} \end{cases}$$

پس مدار معادل تونن چنین می‌شود:



۴۱ـ ضریب تنظیم بار را برای هر یک از مدارهای یکسوکننده زیر به دست آورید.

الف) یکسوکننده نیم موج **ب) یکسوکننده تمام موج**

ج) یکسوکننده نیم موج با صافی خازنی **د) یکسوکننده تمام موج با صافی خازنی**

☑ **راه حل:**

الف)
$$V.R = \frac{V_{dc\,nL} - V_{dc\,fl}}{V_{dc\,fl}} = \frac{\frac{V_m}{\pi} - \frac{V_m}{\pi} \times (\frac{R_L}{R_f + R_L})}{\frac{V_m}{\pi} \times (\frac{R_L}{R_f + R_L})}$$

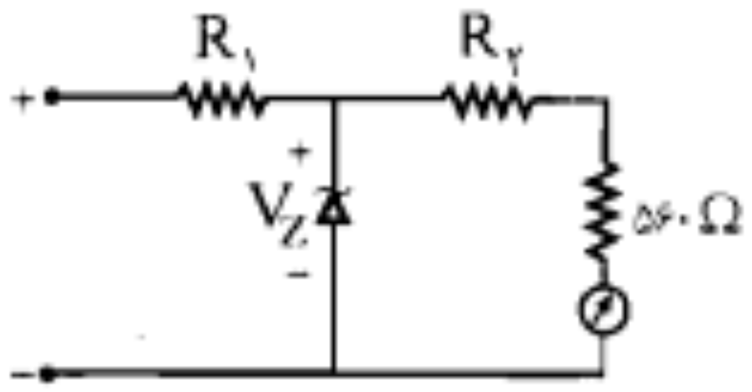
$$= \frac{\frac{V_m}{\pi}(1 - \frac{R_L}{R_f + R_L})}{\frac{V_m}{\pi} \times (\frac{R_L}{R_f + R_L})} = \frac{(\frac{R_f}{R_f + R_L})}{(\frac{R_L}{R_f + R_L})} = \frac{R_f}{R_L} \times 100$$

ب)
$$V.R = \frac{2\frac{V_m}{\pi} - \frac{2V_m}{\pi}(\frac{R_L}{R_f + R_L})}{\frac{2V_m}{\pi}(\frac{R_L}{R_f + R_L})} = \frac{\frac{2V_m}{\pi}(1 - \frac{R_L}{R_f + R_L})}{\frac{2V_m}{\pi}(\frac{R_L}{R_f + R_L})} = \frac{R_f}{R_L} \times 100$$

ج)
$$V.R = \frac{V_m - V_m \times (\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}})}{V_m \times (\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}})} = \frac{V_m(1 - \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}})}{V_m(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}})} = \frac{\frac{R_L + \frac{1}{2fc} - R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}}{\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}} = \frac{1}{2fcR_L} \times 100$$

د)
$$V.R = \frac{V_m - V_m \times \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}}{V_m \times \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}} = \frac{V_m(1 - \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}})}{V_m(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}})} = \frac{(\frac{R_L + \frac{1}{4fc} - R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}})}{(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}})} = \frac{1}{4fcR_L} \times 100$$

۴۲ـ برای حفاظت دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌توان از دیود زنر استفاده نمود بدون اینکه به خطی بودن دستگاه خدشه‌ای وارد شود. مدار شکل م ـ ۴۲ نمایش یک ولت‌متر DC است که حداکثر ولتاژ قابل خواند با آن ۲۵V، مقاومت داخلی آن ۵۶۰ Ω و حداکثر جریان گذرنده از آن ۰/۲ mA است. در صورتی که ولتاژ شکست دیود زنر برابر ۲۰V باشد، مقاومت‌های R_1 و R_2 را طوری به دست آورید که برای دیود زنر هدایت



شکل م-۴۲

نموده و اضافه جریان دستگاه اندازه‌گیری را از خود عبور دهد.

☑ راه حل:

$$KVL: ۲۵ - R_{۱} \times ۰/۲ \le ۲۰ \Rightarrow R_{۱} \ge ۲۵K\Omega$$

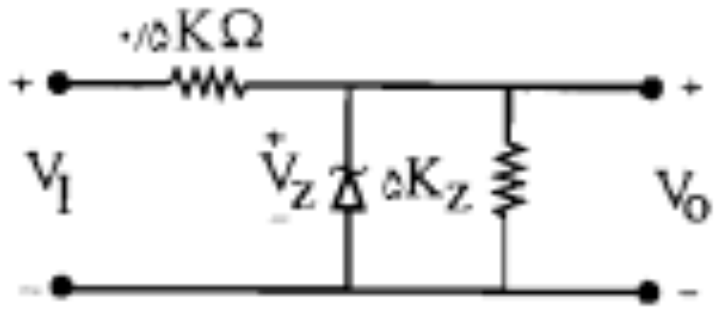
$$KVL: (R_{۲} + R_m) \times ۰/۲ \le ۲۰ \Rightarrow R_{۲} + R_m \le ۱۰۰K$$

$$R_m = ۵۶۰^{\Omega} = ۰/۵۶^{K\Omega} \Rightarrow R_{۲} + ۰/۵۶^{K\Omega} \le ۱۰۰^{K\Omega} \Rightarrow R_{۲} \le ۹۹/۴۴^{K\Omega}$$

۴۳ـ در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل م ـ ۴۳، $I_{Z,max} = ۱۰\,mA$ و $I_K = ۰/۲\,mA$ و $V_Z = ۵V$ است.

الف) با فرض $r_z = ۰$ حداقل و حداکثر مجاز V_I را تعیین نمایید.

ب) در صورتی که $r_z = ۵\Omega$ باشد ΔV_O را به ازای $\Delta V_I = ۲V$ محاسبه کنید.



شکل م-۴۳

☑ راه حل:

الف)

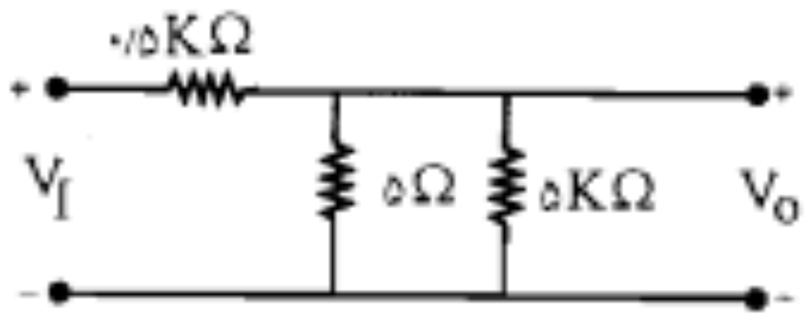
$$i_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{۵V}{۵K\Omega} = ۱mA$$

$$KCL: \frac{V_I - V_Z}{R} = I_Z + I_L \rightarrow \frac{V_I - ۵}{۰/۵} = I_Z + ۱mA$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_K = ۰/۲mA \rightarrow \frac{V_I - ۵}{۰/۵} = ۱/۲ \rightarrow V_I = ۵ + ۰/۶ = ۵/۶V = V_{I_{min}} \\ I_{Z_{max}} = ۱۰\ mA \rightarrow \frac{V_I - ۵}{۰/۵} = ۱۱ \rightarrow V_I = ۵/۵ + ۵ = ۱۰/۵ = V_{I_{max}} \end{cases}$$

$$\rightarrow ۵.۶ \le V_I \le ۱۰.۵$$

ب) مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:

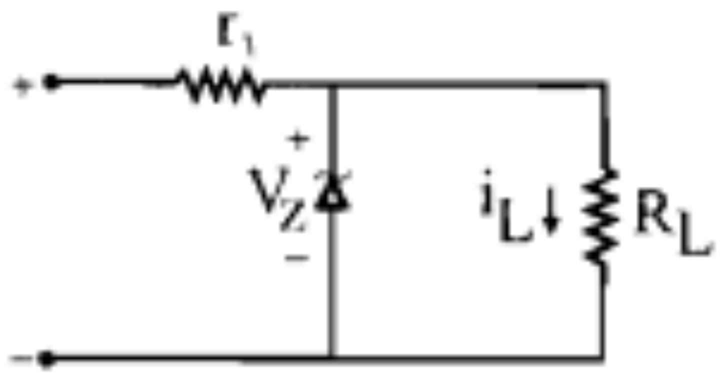


$$\Delta V_{۰} = \Delta V_I \times R_{کل} = \Delta V_I \times \frac{۵۰۰۰ \parallel ۵}{(۵۰۰۰ \parallel ۵) + ۵۰۰} = ۱۹/۷۸mv$$

۴۴ـ در مدار تنظیم کننده ولتاژ م ـ ۴۴ دیود زنر ۱۰ ولتی و جریان حداقل آن ۱۵ mA است. ولتاژ ورودی V_I بین ۱۳ تا ۱۶ ولت و جریان i_L بین ۱۰ mA تا ۸۵ mA تغییر می‌کند.

الف) حداکثر مقدار r_i را به دست آورد.

ب) با استفاده از r_i فوق حداکثر توان تلف شده توسط دیود زنر را به دست آورید.



شکل م-۴۴

☑ راه حل:

الف) طبق فرض مسئله $V_Z = ۱۰^V$ و $I_K = ۱۵mA$ و $۱۳V \le V_I \le ۱۶V$ و $۱۰\,mA \le I_L \le ۸۵mA$

$$I_{L_{max}} = \frac{V_{i_{min}} - V_Z}{r_{i_{max}}} - I_K \rightarrow ۸۵^{mA} = \frac{۱۳ - ۱۰}{r_i} - ۱۵^{mA}$$

$$\rightarrow ۱۰۰^{mA} = \frac{۳}{r_i} \rightarrow r_i = \frac{۳}{۱۰۰} = ۳۰\Omega$$

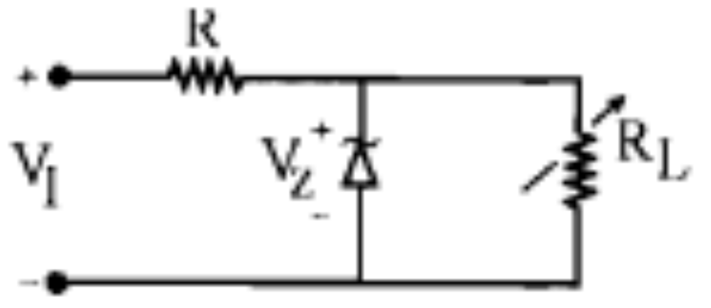
ب)

$$I_{Z_{(max)}} = \frac{V_{i_{max}} - V_Z}{r_i} - I_{L_{(min)}}$$

$$\Rightarrow I_{Z_{(max)}} = \frac{۱۶ - ۱۰}{۰/۰۳K\Omega} - ۱۰ = ۱۹۰mA$$

$$P_{Z_{(max)}} = I_{Z_{(max)}} \times V_Z = ۱۹۰^{mA} \times ۱۰^{V} = ۱/۹^{W}$$

۴۵ـ در مدار شکل م ـ ۴۵، با فرض مقادیر $R_{L,min} = ۱K\Omega$ و $I_{z,max} = ۱۰\,mA$ و $I_K = ۰/۲\,mA$ و $V_Z = ۶/۸V$ و $۱۱V \le V_I \le ۱۳V$ مقدار مقاومت R و نیز $R_{L,max}$ را محاسبه کنید.



شکل م-۴۵

☑ راه حل: این مدار یک مدار تنظیم کننده ولتاژ است و در این مدار رابطه زیر برقرار است:

$$i_{L\,max} = \frac{V_Z}{R_{L\,min}} = \frac{۶/۸V}{۱K\Omega} = ۶/۸mA$$

www.PnuEB.com

$$i_{L\,max} = i - I_K = \frac{V_{i\,min} - V_Z}{R} - I_K = \frac{۱۱ - ۶/۸}{R} - ۰/۲ = ۶/۸$$

$$\rightarrow \frac{۱۱ - ۶/۸}{R} = ۷ \rightarrow \frac{۴/۲}{۷} = R = ۰/۶\ K\Omega$$

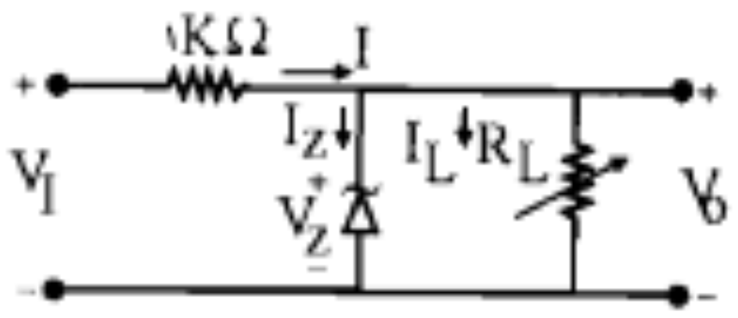
$$I_{L\,min} = \frac{V_{i\,max} - V_Z}{R} - I_{Z\,max} = \frac{۱۳ - ۶/۸}{۰/۶} - ۱۰ = ۰/۳۳\ mA$$

$$R_{L\,max} = \frac{V_Z}{i_{L\,min}} = \frac{۶/۸}{۰/۳۳} = ۲۰/۶\ K\Omega$$

۴۶ـ مدار شکل م ـ ۴۶ را با فرض $I_{Z\,max} = ۳/۶\,mA$ و $I_K = ۰/۲\,mA$ در نظر بگیرید.

الف) مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت R_L را به‌گونه‌ای تعیین کنید که تنظیم ولتاژ به خوبی صورت پذیرد. ولتاژ ورودی بین ۸ تا ۱۰ ولت تغییر می‌کند و $V_Z = ۶/۲^V$ است.

ب) اگر $R_L = ۲۰\ K\Omega$ بوده و دیود زنر دارای مقاومت داخلی ۵Ω باشد درصد تغییرات ولتاژ خروجی را به ازای تغییرات ولتاژ ورودی به دست آورید.



شکل م-٤٦

☑ **راه حل:**

الف) این مدار یک مدار تنظیم کننده ولتاژ می‌باشد و در این مدار روابط زیر را داریم:

$$\begin{cases} I_{max} = I_{L\,min} + I_{Z\,max} & (۱) \\ I_{min} = I_{L\,max} + I_{z\,min} & (۲) \end{cases}$$

از طرفی
$$\begin{cases} I_{max} = \dfrac{V_{(max)} - V_Z}{R_i} \\ I_{L\,min} = \dfrac{V_Z}{R_{L\,max}} \end{cases}$$

$$(۱) \rightarrow I_{max} = I_{L\,min} + I_{z\,min}$$

$$\xrightarrow{(۱)} \frac{V_{i\,max} - V_Z}{۱K\Omega} = \frac{V_Z}{R_{L\,max}} + ۳/۶\ mA$$

$$\rightarrow \frac{۱۰ - ۶/۲}{۱K\Omega} = \frac{۶/۲}{R_{L\,max}} + ۳/۶ \rightarrow ۳/۸ - ۳/۶ = \frac{۶/۲}{R_{L\,max}} \rightarrow R_{L\,max} = \frac{۶/۲}{۰/۲} = ۳۱K\Omega$$

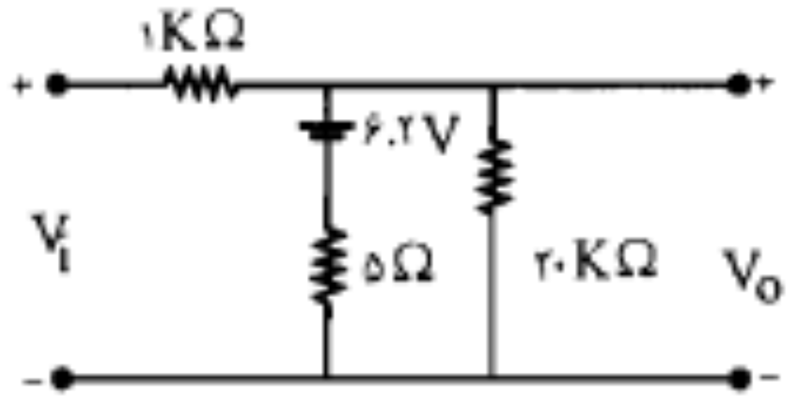
از طرفی
$$\begin{cases} I_{min} = \dfrac{V_{i\,min} - V_Z}{R_i} \\ I_{L\,max} = \dfrac{V_Z}{R_{L\,min}} \end{cases}$$

$$(۲) \rightarrow I_{min} = I_{max} + I_{Z\,min}$$

$$\xrightarrow{(۲)} I_{min} = \frac{V_{i\,min} - V_Z}{R_i} = \frac{V_Z}{R_{L\,min}} + I_{Z\,min}$$

$$\rightarrow \frac{۸ - ۶/۲}{۱K\Omega} = \frac{۶/۲}{R_{L\,min}} + ۰/۲ \rightarrow ۱/۸ - ۰/۲ = \frac{۶/۲}{R_{L\,min}} \rightarrow R_{L\,min} = \frac{۶/۲}{۱/۶} = ۳/۸۷۵\ K\Omega$$

ب) مدار معادل به صورت شکل زیر می‌باشد:

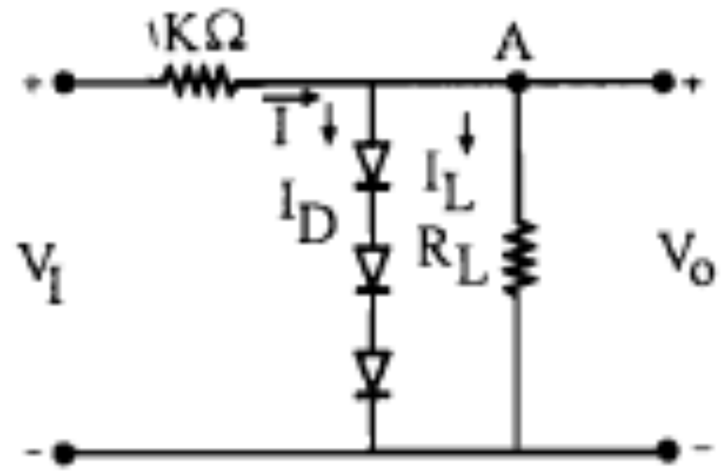


$$V_O = \frac{V_i}{۱۰۰۰ + ۵ \parallel ۲۰۰۰}(۵ \parallel ۲۰۰۰) + \frac{۶.۲}{۵ + ۱۰۰۰ \parallel ۲۰۰۰}(۱۰۰۰ \parallel ۲۰۰۰)$$

$$= V_i \times ۴/۹۶ \times ۱۰^{-۳} + ۶/۱۵ \rightarrow \begin{cases} V_{O\,max} = ۶/۱۹۹۶^V \\ V_{O\,min} = ۶/۱۸۹۶^V \end{cases}$$

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta V_i} \times ۱۰۰ = \frac{۰/۰۱}{۲} \times ۱۰۰ = ۰/۵\,\%$$

۴۷ـ در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل م ـ ۴۷ از دیودهای معمولی مشابه با $V_\gamma = ۰/۷V$ استفاده شده است. در صورتی که ولتاژ ۴ ولتی ورودی به اندازه ۰/۵V ± تغییرات داشته باشد، تغییرات ولتاژ خروجی چه مقدار خواهد بود؟ ($R_L \gg ۳rd$، لازم است rd محاسبه شود).



شکل م-٤٧

☑ **راه حل:**

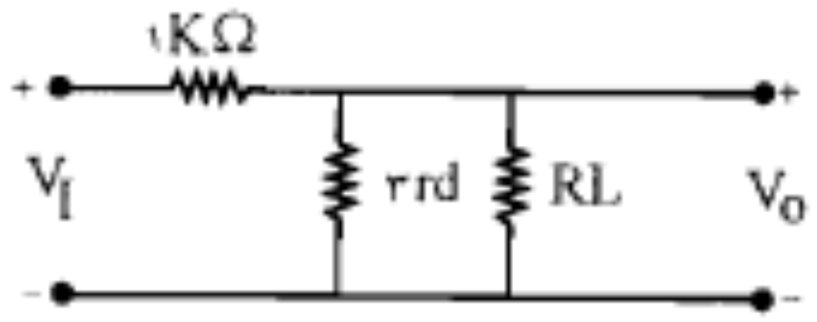
$$V_A = ۳ \times V_d = ۳ \times ۰/۷ = ۲/۱V$$

در نقطه A $KCL: I = I_D + I_L \rightarrow \frac{۴ - ۲/۱}{۱} = I_D + \frac{۲/۱}{R_L} \rightarrow I_D \cong ۱/۹\,mA$

$$\rightarrow rd = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{۲ \times ۲۶}{۱/۹} = ۲۷\Omega$$

www.PnuEB.com

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$R_L \gg ۳rd \to R_{R_L \| rd} = ۳rd$$

$$V_O = \frac{V_i \times rd^{\Omega}}{R_i + rd} = \frac{V_۱ \times ۲۷ \times ۳}{۱۰۰۰ + ۲۷ \times ۳} = V_i \times (۰/۰۷۵^{\Omega}) \times ۱۰۰۰ = V_i \times ۷۵\ mV$$

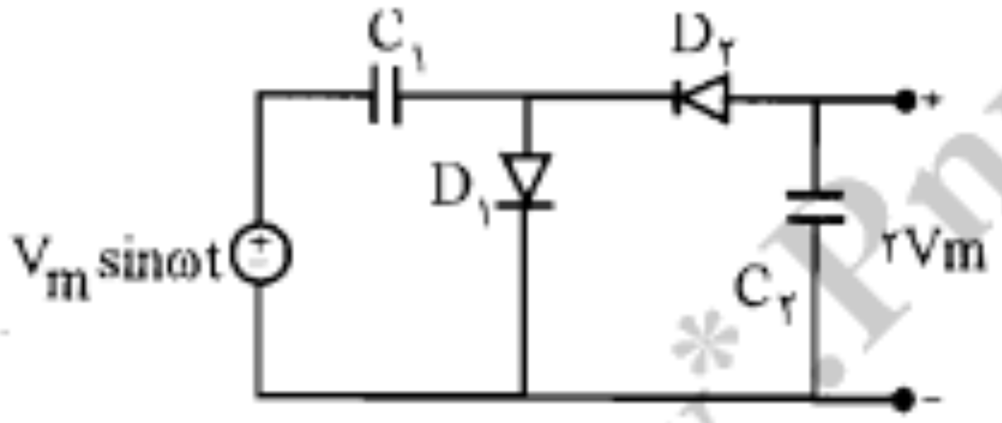
$$\Delta V_I = \pm ۰/۵V$$

$$\to \Delta V_O = (\pm ۰/۵) \times ۷۵ \cong ۳۸mV$$

۴۸ ـ مدار شکل م ـ ۴۸ را در نظر بگیرید.

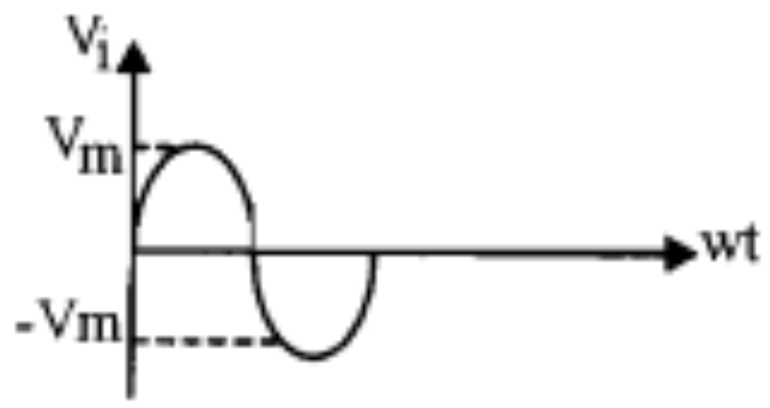
الف) توضیح دهید که چگونه این مدار به صورت یک مدار دو برابر کننده ولتاژ عمل می‌کند؟

ب) چگونه می‌توان با تکمیل این مدار یک مدار چهار برابر کننده ولتاژ به دست آورد؟



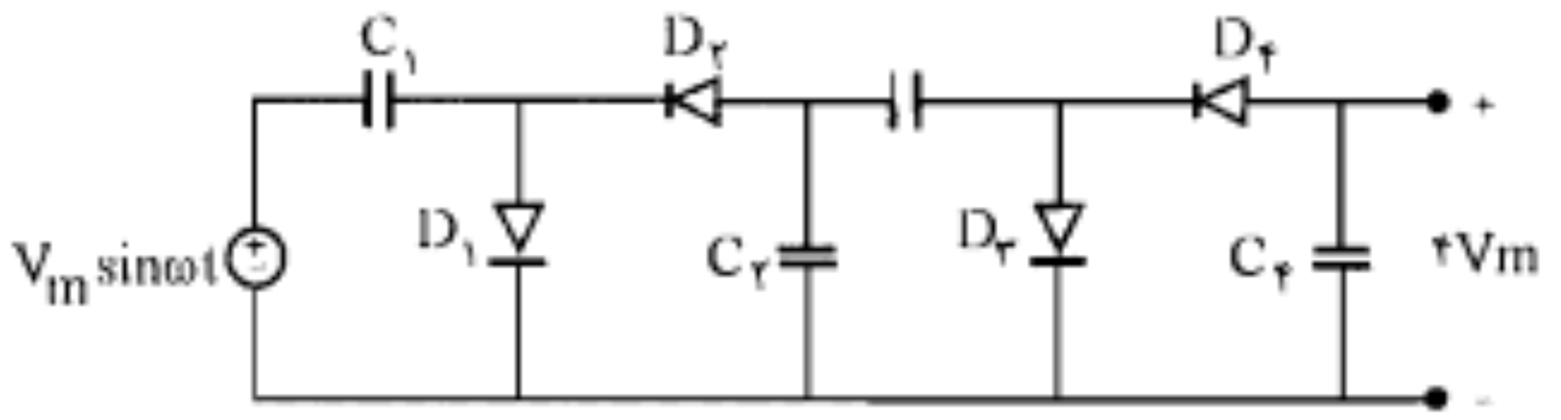
شکل م-۴۹

☑ **راه حل:**



الف) در سیکل اول وقتی V_i مثبت است دیود $D_۱$ هدایت می‌کند و دیود $D_۲$ قطع می‌باشد و خازن $C_۱$ از طریق دیود $D_۱$ شارژ شده به اندازه حداکثر مقدار ولتاژ ورودی یعنی مقدار V_m+ شارژ می‌شود، به محض اینکه ولتاژ ورودی از حداکثر مقدار رد شد و به حداقل مقدار خود یعنی V_m- رسید دیود $D_۱$ قطع شده ولی خازن $C_۱$ همچنان در حالت شارژ می‌ماند و دیود $D_۲$ وصل می‌شود در این حالت خازن $C_۲$ نیز به اندازه V_m شارژ می‌شود. با عبور V_i از مقدار حداقل به مقدار حداکثر دوباره دیود $D_۲$ قطع و دیود $D_۱$ شارژ می‌شود ولی مقدار ولتاژ خازن $C_۲$ تغییر نمی‌کند. از این لحظه به بعد ولتاژ خروجی $V_ـ$ برابر مجموع ولتاژهای دو خازن $C_۱$ و $C_۲$ است و مساوی $۲V_m$ می‌باشد.

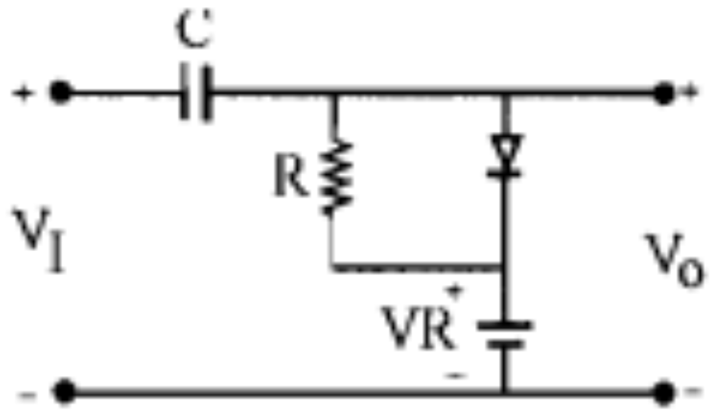
ب) مدار چهار برابر کننده:



۴۹ ـ در مدار کلمپ شکل م ـ ۴۹ دامنه شکل موج مثلثی ورودی برابر ۴ ولت است.

الف) شکل موج خروجی را به ازای مقادیر $V_R = ۲V$ و $V_R = -۲V$ رسم نمایید.

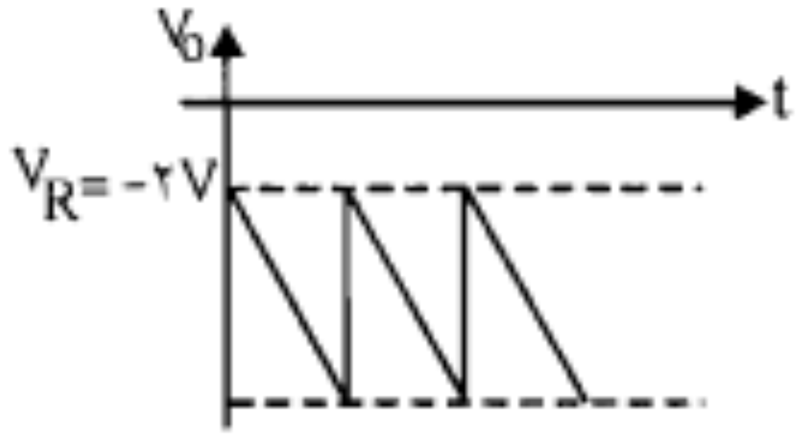
ب) در صورتی که $V_R = \pm ۵V$ باشد آیا مدار، ورودی را کلمپ خواهد کرد؟ چرا؟



شکل م-۴۹

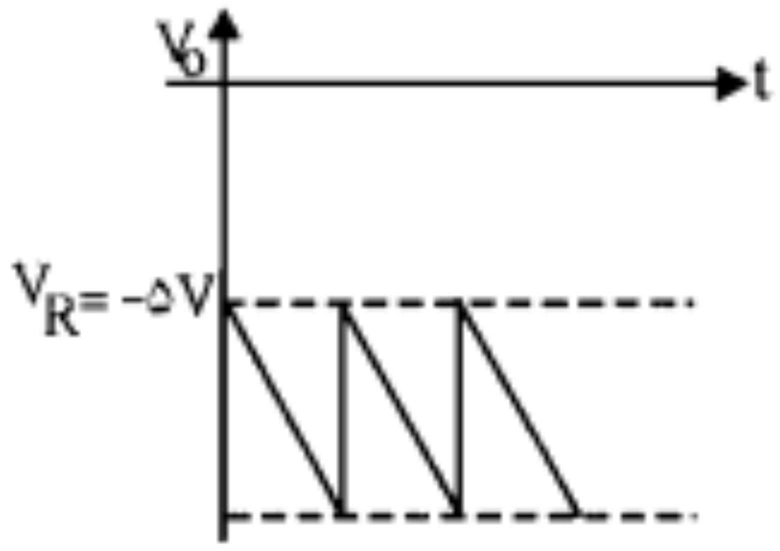
☑ **راه حل:**

الف) با توجه به شکل م ـ ۴۹ ولتاژ خروجی برابر $V_D + V_R$ است وچون $V_D = V_s - V_m$ در سطح صفر کلمپ شده است و در نتیجه خروج (V_O) کلمپ شده در سطح V_R خواهد بود.



ب) در $V_R = ۵V$ مدار کار نمی‌کند ولی در $V_R = -۵V$ خروجی در سطح ۵V- کلمپ می‌کند.

با $V_R = +۵V$ $(V_R > V_۱(max))$ لذا کلمپ انجام نمی‌شود و دیود ON نمی‌شود.



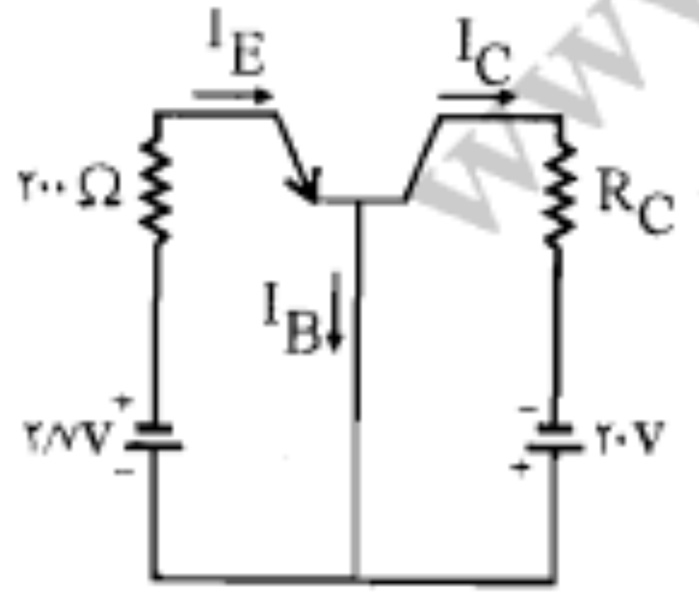
www.PnuEB.com

فصل ۴
ترانزیستور پیوندی دوقطبی

۱ـ در مدار شکل م ـ ۱، ترانزیستور دارای $\alpha = ۰/۹$ و $|V_{BE}(ON)| = ۰/۷V$ است.

الف) جریان‌های I_E و I_C و I_B را محاسبه کنید.

ب) اگر بخواهیم قدر مطلق ولتاژ V_{CE} از ۲۰ ولت تجاوز نکند ($|V_{CE\,max}| = ۲۰^V$) حداقل مقدار R_C چقدر باشد؟



شکل م-۱

☑ **راه حل:**

الف) در حلقه $۲۰۰\,\Omega$، $۲/۷^V$ و V_{EB}، KVL می‌زنیم.

$$KVL: -۲/۷V + ۰/۲I_E + ۰/۷V = ۰ \rightarrow I_E = ۱۰\,mA$$

$$I_C = \alpha I_E = ۰/۹ \times ۱۰ = ۹\,mA$$

$$I_C = \frac{\alpha}{۱-\alpha} I_B \rightarrow ۹\,mA = \frac{۰/۹}{۱ - ۰/۹} I_B \rightarrow I_B = ۱\,mA$$

ب) در حلقه R_C و V_{EC} و ۲۰^V ـ و $۲۰۰\,\Omega$ و $۲/۷^V$، KVL می‌زنیم.

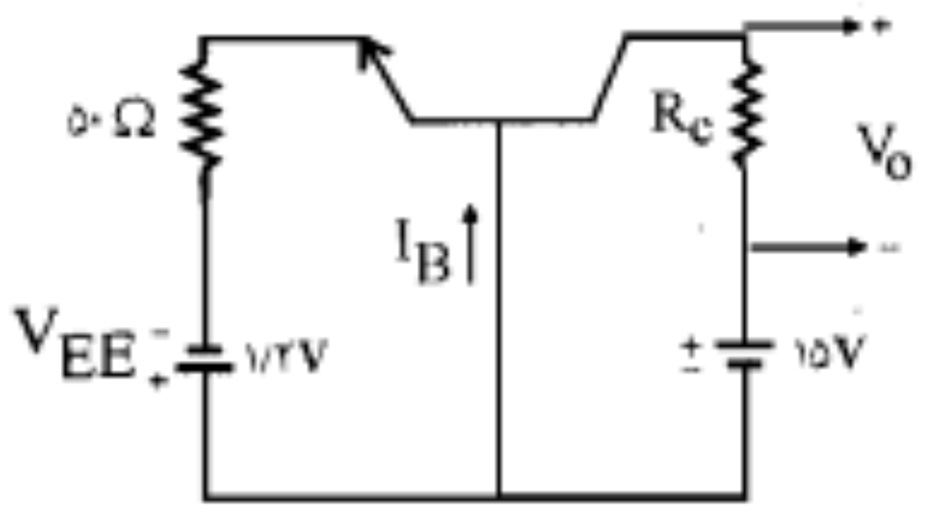
$$KVL: -۲۰ - ۲.۷ + ۰.۲I_E + R_C I_C + V_{EC} = ۰ \rightarrow$$

$$|V_{CE}| = ۲۰/۷ - ۹R_C = ۲۰V \rightarrow R_{C\,min} = ۷۷/۷۷\,\Omega$$

۲ـ در مدار شکل م ـ ۲ ترانزیستور دارای $\alpha = ۰/۹$ و $V_{BE}(ON) = ۰/۷V$ است.

الف) به ازای چه مقدار R_C، قدر مطلق ولتاژ خروجی برابر ۴/۵ ولت می‌شود؟ در این صورت V_{CE} چقدر خواهد بود؟

ب) اگر بخواهیم با مقاومت R_C محاسبه شده در بند (الف) ولتاژ V_{CB} برابر ۷/۵ ولت شود، V_{EE} را چقدر باید تغییر داد؟



شکل م-۲

☑ **راه حل:**

الف) با نوشتن KVL در حلقه $۵۰\,\Omega$ و V_{EB} و V_{EE} داریم:

$$KVL: -۱/۲V + ۰/۰۵I_E + ۰/۷V = ۰ \rightarrow I_E = ۱۰\,mA$$

$$I_C = \alpha I_E = ۹\,mA$$

$$V_o = R_C I_C = ۹R_C = ۴/۵ \rightarrow R_C = ۰/۵k\Omega$$

ب) در حلقه V_{CE} و R_C و ۱۵^V و V_{EE} و $۵۰\,\Omega$، KVL می‌زنیم:

$$V_{CE} = ۱۵^V + ۱/۲^V - ۰/۵ \times ۹ - ۱۰ \times ۰/۰۵ = ۱۱/۲V$$

در حلقه ۱۵V و V_{CB} و R_C می‌زنیم. $KVL: V_{CB} = ۷/۵ = ۱۵ - ۰/۵I_C \rightarrow I_C = ۱۵\,mA$

$$I_E = \frac{۱}{\alpha} I_C = \frac{۱۵}{۰/۹} = ۱۶/۶۷\,mA$$

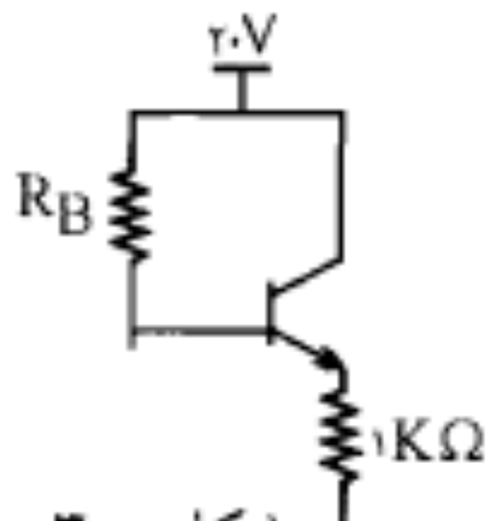
$$V_{EE} = ۰/۷ + ۰/۰۵ \times ۱۶/۶۷\,mA = ۱/۵۳V \Rightarrow \Delta V_{EE} = ۱/۵۳ - ۱/۲ = ۰/۳۳$$

۳ـ برای ترانزیستور مدار شکل م ـ ۳، فرض کنید $\beta = ۱۰۰$ و $V_{BE}(ON) = ۰/۷^V$ باشد.

الف) مقدار R_B را به‌گونه‌ای تعیین کنید که $V_{CE} = ۱۰^V$ شود.

www.PnuEB.com

ب) در صورتی که β ترانزیستور برابر ۱۵۰ باشد، با R_B محاسبه شده در بند (الف) ولتاژ V_{CE} چقدر خواهد بود؟



شکل م-۳

☑ **راه حل:**

الف) در حلقه ۲۰V و V_{CE} و R_E: $KVL: V_{CE} = ۱۰^V = ۲۰^V - ۱I_E \to I_E = ۱۰mA$

$I_B = \frac{I_E}{۱+\beta} = ۰/۰۹۹mA$

در حلقه ۲۰V و R_B و V_{BE} و R_E: $KVL: -۲۰ + R_B I_B + ۰/۷ + ۱\times I_E = ۰ \to$

$-۲۰ + ۰.۰۹۹R_B + ۰.۷ + ۱۰ = ۰ \to R_B = ۹۳.۹۴ K\Omega$

ب) $KVL: -۲۰ + ۹۳/۹۴ I_B + ۰/۷ + ۱\times I_E = ۰ \to I_E = ۱۹/۳ - ۹۳/۹۴ I_B$ (I)

از طرفی: $I_E = (۱+\beta) I_B = ۱۵۱\times I_B$ (II)

با قرار دادن (II) در (I) → $۱۵۱ I_B = ۱۹/۳ - ۹۳/۹۴ I_B \to ۲۴۴/۹۴ I_B = ۱۹/۳ \to$

$I_B = ۰/۰۷۹$

$\to I_E = ۱۵۱\times I_B = ۱۱/۹mA$

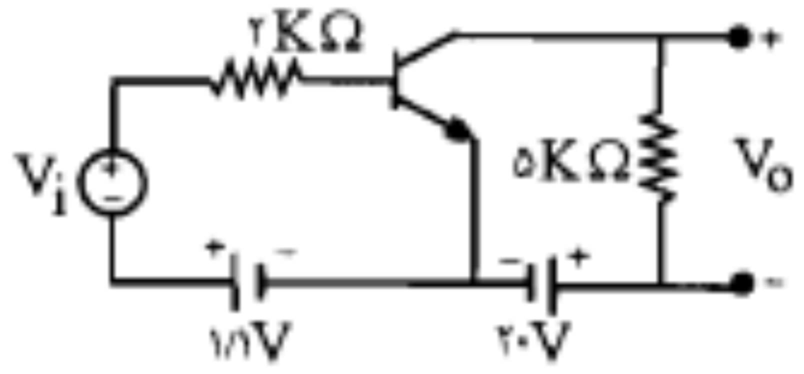
$V_{CE} = ۲۰ - R_E I_E = ۲۰ - ۱۱/۹ = ۸/۱V$

۴ـ در تقویت کننده امیتر مشترک شکل م ـ ۴، $\alpha = ۰/۹$ و $V_{BE}(ON) = ۰/۷^V$ و ولتاژ ورودی بر حسب ولت برابر $V_i = ۰.۱\sin\omega t$ است.

الف) ولتاژ خروجی V_o چقدر است؟

ب) مقدار حداقل ولتاژ V_{CE} را محاسبه کنید.

ج) در صورتی که بخواهیم V_{CE} از ۰/۳ ولت کمتر نشود، حداکثر دامنه ولتاژ ورودی سینوسی چقدر می‌تواند باشد؟



☑ **راه حل:**

تحلیل DC: در حلقه ۱/۱V و V_{BE} و R_B: $KVL: -۱/۱ + ۰/۷ + ۲I_B \to I_B = ۰/۲mA$

$\to I_C = \frac{\alpha}{۱-\alpha} I_B = \frac{۰/۹}{۱-۰/۹} I_B = ۱/۸mA$

$V_O = -R_C I_C = -۹V$

تحلیل ac: $-V_i + ۲I_B = ۰ \to i_B = \frac{V_i}{۲} mA$

$V_O = -۵i_C = -۵\times ۹ i_B = \frac{V_i}{۲} mA$

الف) $V_O = V_{O(dc)} + V_{O(ac)} \Leftarrow$

$V_O = -۹ - ۲/۲۵\sin\omega t$

ب) $V_{CE} = ۲۰ + V_O \Rightarrow V_{CE\,min} = ۲۰ + V_{O\,min}$

$V_{Omin} = -۹ - ۲/۲۵ = -۱۱/۲۵V$

$\to V_{CE\,min} = ۲۰ - ۱۱/۲۵ = ۸/۷۵V$

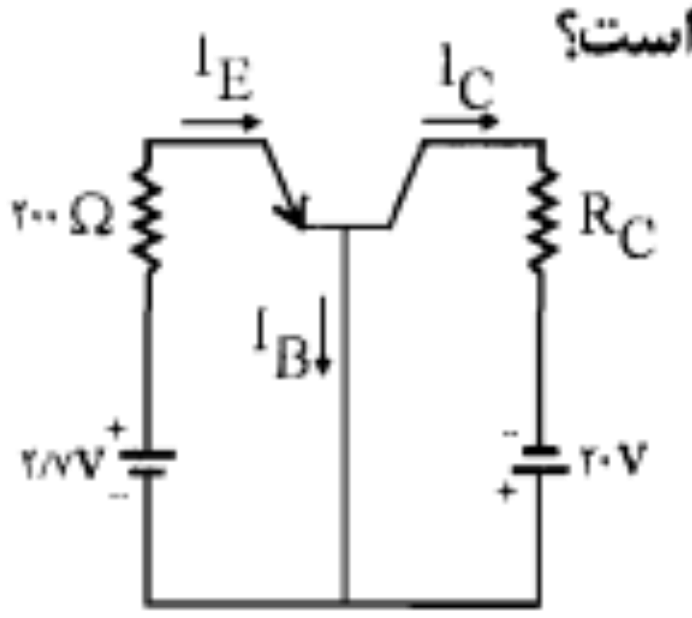
ج) $V_{CE\,min} = ۰/۳^V \Rightarrow V_{CE} = ۲۰ + V_O = ۲۰ + (-۹ - ۲۲/۵V_i) = ۰/۳^V \Rightarrow V_{i\,max} = ۰/۴۷۵^V$

۵ـ در مدار شکل م ـ ۵ ترانزیستور دارای $\alpha = ۰/۹$ و $|V_{BE}(ON)| = ۰/۷V$ می‌باشد.

الف) مقدار مقاومت R_E چقدر باشد تا جریان کلکتور در ناحیه ۱/۸mA شود؟

ب) مقدار R_C که ترانزیستور را به مرز اشباع می‌برد چقدر است؟ ($|V_{CE}(sat)| = ۰/۲V$)

ج) برای ثابت ماندن جریان I_C چه مقادیری برای R_C قابل قبول است؟



شکل م-۱

☑ **راه حل:**

الف) $I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{۱/۸}{۰/۹} = ۲mA$

در حلقه ۳/۷V و V_{BE} و R_E: $KVL: -۳/۷ + ۰/۷ + R_E I_E = ۰ \to R_E = ۱/۵K\Omega$

www.PnuEB.com

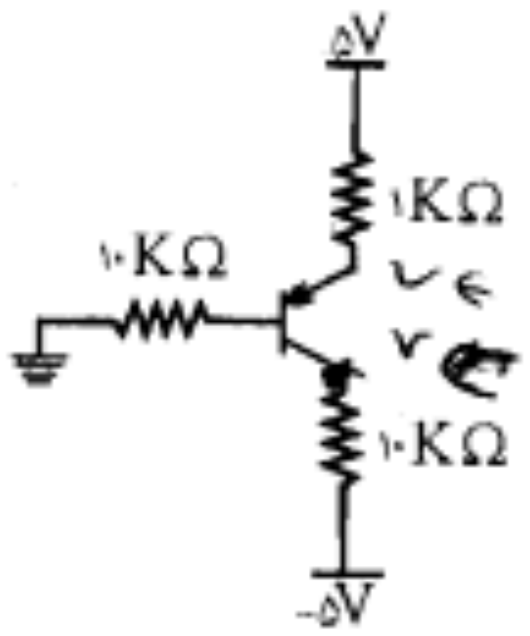
ب) $(R_C \geq ۱۱/۳۹)$

KVL در حلقه V_{CE} و R_C و R_E و $۳/۷^V$ و ۲۰^V

$$|V_{CE}| = ۲۰ - R_C I_C - R_E I_E + ۳/۷ = ۰/۲V \to R_C = ۱۱/۳۹\ K\Omega$$

ج) در صورتی که $R_C < ۱۱/۳۹ K\Omega$ باشد جریان I_C ثابت خواهد ماند. چون به ازای $R_C < ۱۱/۳۹$ ترانزیستور در ناحیه فعال کار می‌کند.

۶ـ در مدار شکل م ـ ۶، مقادیر ولتاژهای V_C و V_E و V_B و جریان‌های I_C، I_B و I_E را با فرض $\beta = ۳۰$ محاسبه نمایید.



شکل م-۶

راه حل:

$$KVL: -۵ + ۰/۷ + ۱۰ I_B + ۱ \times I_E = ۰ \quad و \quad I_E = (۱+\beta) I_B = ۳۱ I_B$$

$$\to I_B = ۱۰۴/۹\ \mu A$$

$$I_E = (۱+\beta) I_B = ۳/۲۵mA \qquad I_C = \beta I_B = ۳۰ \times ۱۰۴/۹\mu A = ۳/۱۵mA$$

$$V_B = R_B I_B = ۱۰ \times ۱۰۴/۹mA = ۱/۰۴۹V$$

$$V_C = -۵ + R_C I_C = -۵ + ۱۰ \times ۳/۱۵ = ۲۶/۵V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = ۲۶/۵ - ۱/۷۵ = ۲۴/۷۵V$$

پس نتیجه می‌گیریم تمام محاسبات اشتباه بوده و ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد:

$$I_{C\,sat} = \frac{۵ - (-۵) - ۰/۲}{۱ + ۱۰} = ۰/۸۹mA$$

$$v_{CE}(sat) = +۰/۲V$$

$$I_E = I_C = ۰/۸۹\ mA$$

$$V_E = ۵ - I_E(sat)\ R_E = ۵ - ۰/۸۹ \times ۱ = ۴/۱۱V$$

$$V_{BE}(sat) = ۰/۸^V \to V_B = ۴/۱۱ - ۰/۸ = ۳/۳۱V$$

$$I_B = \frac{۳/۳۱}{۱۰ k\Omega} = ۰/۳۳۱\ mA$$

$$\beta_{sat} = \frac{I_{C\,sat}}{I_{B\,sat}} = ۳ \ll ۳۰$$

$$V_C = -۵ + R_C I_C = ۳/۹V$$

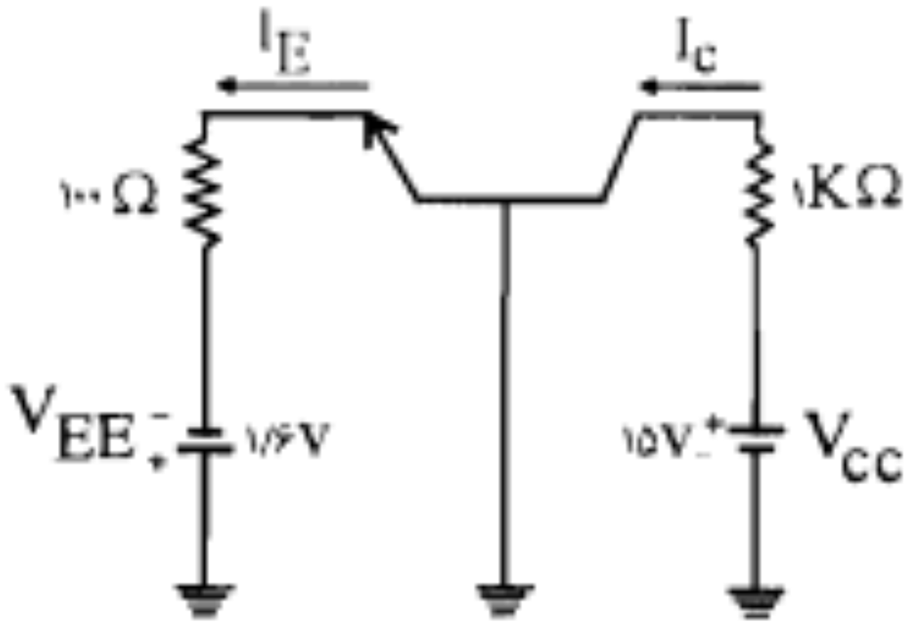
۷ـ در مدار شکل م ـ ۷ ترانزیستور دارای $\beta = ۹$ و $V_{BE}(ON) = ۰/۷$ است.

الف) مقادیر I_E و I_C و V_{CE} را محاسبه نمایید.

ب) به ازای $V_{CC} = ۵V$ اندازه کمیت‌های مذکور را به دست آورید.

$(|V_{CE}(sat)| = ۰/۲V)$

ج) به ازای $V_{CC} = ۵V$، اگر بخواهیم ترانزیستور را به مرز اشباع ببریم، چه مقدار جدیدی برای V_{EE} باید اختیار کنیم؟



شکل م-۷

راه حل:

الف) $$KVL: V_{EE} = R_E I_E + V_{BE} \to ۱/۶ = ۰/۱ I_E + ۰/۷ \to I_E = ۹mA$$

$$I_C = \frac{\beta}{۱+\beta} I_E = \frac{۹}{۱۰} \times ۹mA = ۸/۱mA$$

$$KVL: -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - V_{EE} = ۰$$

$$-۱۵ + ۱ \times ۸/۱ + V_{CE} + ۰/۱ I_E - ۱/۶ = ۰ \to V_{CE} = ۱۵ - ۸/۱ - ۰/۹ + ۱/۶ = ۷/۶V$$

ب) $$KVL: V_{CE} = ۵ - ۸/۱ - ۰/۹ + ۱/۶ = -۲/۴V$$

در نتیجه ترانزیستور فعال نمی‌باشد بلکه در حالت اشباع قرار دارد. $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$

I_E هیچ تغییری نمی‌کند ولی مقدار I_C تغییر می‌کند.

$$KVL: -۵ + ۱ \times I_C + ۰/۲ + ۰/۱ \times ۹ - ۱/۶ = ۰ \to I_C = ۶/۶ - ۱/۱ = ۵/۵mA$$

ج) $$\begin{cases} I_E = \dfrac{V_{EE} - ۰/۸}{۰/۱} \\ (V_{CE} = ۰/۲ \quad , \quad I_C = \dfrac{\beta}{۱+\beta} I_E) \end{cases} \quad (I)$$

$$KVL: -۵ + R_C I_C + R_E I_E + ۰/۲ - V_{EE} = ۰ \qquad (II)$$

مقادیر روابط (I) را در رابطه (II) قرار می‌دهیم:

$$-۵ + ۱ \times ۰/۹\left(\frac{V_{EE} - ۰/۸}{۰/۱}\right) + ۰/۱\left(\frac{V_{EE} - ۰/۸}{۰/۱}\right) + ۰/۲ - V_{EE} = ۰$$

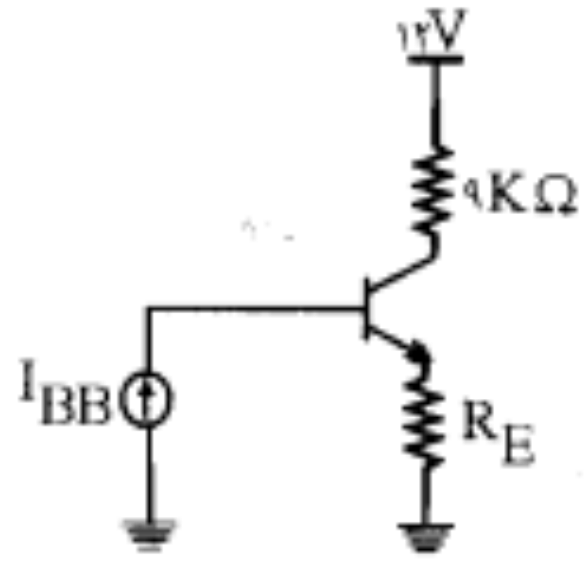
$$-۵ + ۱۰(V_{EE} - ۰/۸) + ۰/۲ - V_{EE} = ۰ \rightarrow -۴/۸ + ۹V_{EE} - ۸ = ۰$$

$$۹V_{EE} = ۱۲.۸ \rightarrow V_{EE} = \frac{۱۲/۸}{۹} = ۱/۴V$$

۸ـ در مدار شکل م ـ ۸ منبع جریان I_{BB} برابر ۰.۰۱ mA است. با فرض $۱۰۰ < \beta < ۲۰۰$ ،

الف) به ازای $R_E = ۱K\Omega$ ترانزیستور در چه وضعیتی قرار دارد؟

ب) به ازای چه مقادیری از R_E ، ترانزیستور همواره در اشباع خواهد بود؟



شکل م-۸

☑ **راه حل:**

الف) اگر با β متوسط مقدار I_E را محاسبه کنیم داریم:

$$I_E = \beta_{av} I_B = \left(\frac{۱۰۰ + ۲۰۰}{۲}\right) \times ۰/۰۱ = ۱/۵mA$$

$$V_{CE} = ۱۲ - (۹ + ۱) \times ۱/۵ = -۳V$$

در نتیجه ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد.

ب) به ازای $V_{CE} \le ۰/۲$ ترانزیستور همواره در حالت اشباع قرار دارد پس:

$$KVL: -۹I_C + ۱۲ - R_E(I_B + I_C) \le ۰/۲ \Rightarrow -(+۹ + R_E)I_C - R_E I_B \le -۱۱/۸ \Rightarrow$$

$$-(۹ + R_E) \times \beta I_B - R_E I_B \le -۱۱/۸ \Rightarrow \left[(۹ + R_E)\beta + R_E\right] \times I_B \ge ۱۱/۸ \Rightarrow$$

$$\left[(۹ + R_E)\beta + R_E\right] \times ۰/۰۱ \ge ۱۱/۸$$

چون می‌خواهیم طرف اول رابطه مقابل به ازای جمیع مقادیر β بزرگتر از ۱۱/۸ باشد بنابراین کمترین مقدار آن یعنی به ازاء $\beta_{min} = ۱۰۰$ نیز باید طرف اول بزرگ‌تر از ۱۱/۸ باشد لذا داریم:

$$(۹ + R_E) \times ۱۰۰ + R_E \ge \frac{۱۱/۸}{۰/۰۱} \Rightarrow ۹۰۰ + ۱۰۱R_E \ge ۱۱۸۰ \Rightarrow R_E \ge \frac{۲۸۰}{۱۰۱}$$

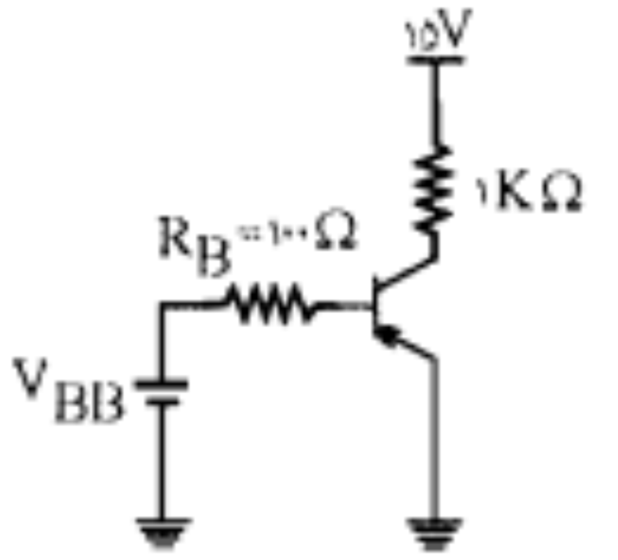
$\Rightarrow R_E \ge ۲/۷۷K\Omega$ به ازای این مقادیر R_E ترانزیستور همواره در حالت اشباع قرار دارد.

۹ـ در مدار شکل م ـ ۹ ترانزیستور از نوع ژرمانیم و دارای $I_{CBO} = ۱\mu A$ در دمای $۲۵^{\circ C}$ است.

الف) V_{BB} را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در دمای $۲۵^{\circ C}$ در حالت قطع باشد.

ب) آیا با V_{BB} محاسبه شده در بند (الف) ترانزیستور در دمای $۸۵^{\circ C}$ نیز در حالت قطع خواهد ماند؟ مقدار لازم برای V_{BB} جهت قطع ترانزیستور در این دما چقدر است؟

ج) در صورتی که $V_{BB} = ۳V$ و $R_B = ۳۰K\Omega$ باشد، تا چه دمایی ترانزیستور در وضعیت قطع خواهد ماند؟



شکل م-۹

☑ **راه حل:**

الف) $V_{BE(cut)} = +۰/۱V$ $I_B = I_{CBO} = ۱\mu A$

$$V_{BB} = ۱۰۰ \times ۱۰^{-۳} + ۰/۱ = ۰/۲V$$

پس باید $V_{BB} \ge ۰/۲V$ باشد.

ب)

$$I_{CBO}(۸۵^{\circ}) = I_{FCBO}(۲۵^{\circ}) \times ۲^{\frac{۸۵-۲۵}{۱۰}} = ۱ \times ۲^{۶} = ۶۴\mu A$$

$$V_B = V_{BB} - R_B I_{CBO} = ۰/۲ - ۱۰۰ \times ۰/۰۶۴ = -۶/۲V$$

ترانزیستور در دمای فوق در حالت فعال قرار دارد.

$$V_{BB} = ۱۰۰ \times ۰/۰۶۴ + ۰/۱ = ۶/۵V \rightarrow V_{BB} > ۶/۵V$$

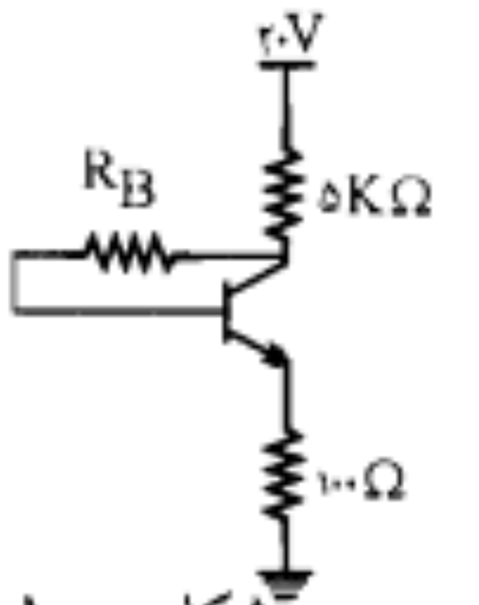
در این حالت ترانزیستور در حالت قطع قرار می‌گیرد.

ج)

$$V_{BB} = ۳۰I_{CBO} + ۰/۱ = ۳V \rightarrow I_{CBO} = ۹۶/۶۷\mu A$$

$$۹۶/۶۷ = ۱ \times ۲^{\frac{T-۲۵}{۱۰}} \Rightarrow Ln\,۹۶/۶۷ = \frac{T-۲۵}{۱۰} Ln\,۲ \rightarrow T = ۹۱^{\circ C}$$

۱۰ـ در مدار شکل م ـ ۱۰ در صورتی که از یک ترانزیستور با $\beta = ۱۰۰$ استفاده کرده باشیم، به ازای چه مقدار R_B ، ولتاژ V_{CE} برابر ۴V خواهد شد؟



شکل م-۱۰

☑ راه حل:

از طرفی: $I_C + I_B = I_E$

$KVL: -۲۰ + ۵k\Omega\,(I_C + I_B) + V_{CE} + ۰/۱ I_E = ۰$

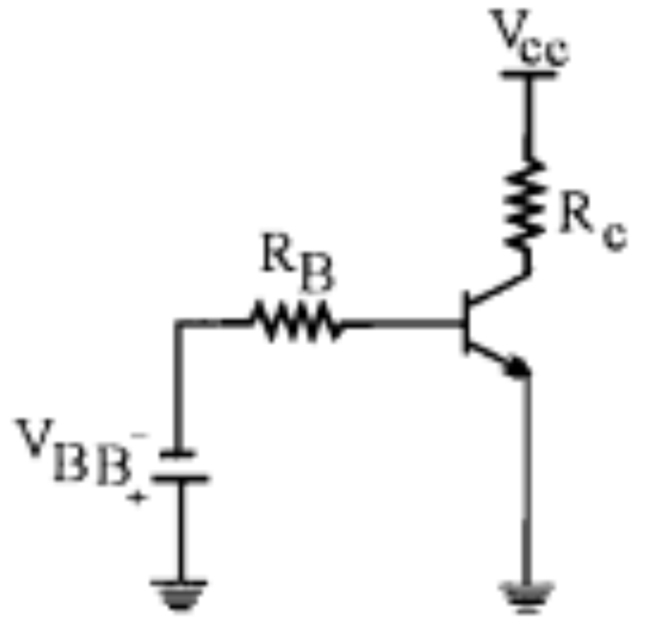
$\rightarrow -۲۰ + ۵/۱ I_E + ۴ = ۰ \rightarrow I_E = ۳/۱۴ mA$

$KVL: -۲۰ + ۵ I_E + R_B \frac{I_E}{۱+\beta} + ۰/۷ + ۰/۱ I_E = ۰$

$\rightarrow -۲۰ + ۵\times ۳/۱۴ + R_B \times \frac{۳/۱۴}{۱۰۱} + ۰/۷ + ۰/۱ \times ۳/۱۴$

$۳/۲۸۹ = R_B \times \frac{۳/۱۴}{۱۰۱} \rightarrow R_B = ۱۰۵/۷\, k\Omega$

۱۱ـ در مدار شکل م ـ ۱۱، از یک ترانزیستور سیلیکنی با $I_{CBO} = ۱۰\, nA$ در دمای ۲۵°C استفاده شده، که به ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما این جریان دو برابر می‌شود.



شکل م-۱۱

الف) با فرض $V_{BB} = ۸V$، به ازای چه مقدار R_B ترانزیستور در دمای ۱۸۵°C در حالت قطع باقی می‌ماند؟

ب) اگر $V_{BB} = ۲V$ و $R_B = ۲۰\, K\Omega$ باشد، تا چه دمایی ترانزیستور در حالت قطع باقی خواهد ماند؟

☑ راه حل:

الف) در حالت قطع $V_{BE} = ۰^V$

$I_{CBO}(۱۸۵°) = ۱۰\, nA \times ۲^{\frac{۱۸۵-۲۵}{۱۰}} = ۰/۶۵ mA$

از طرفی $I_B \le -I_{CBO}$

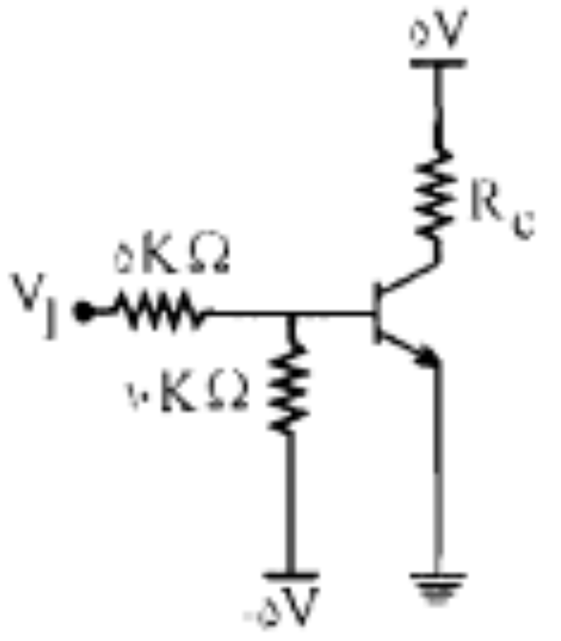
$R_B I_B = -V_{BB} - V_{BE} = -V_{BB} \Rightarrow I_B = \frac{-V_{BB}}{R_B} \le -۰/۶۵$

$\Rightarrow \frac{V_{BB}}{R_B} \ge ۰/۶۵ \Rightarrow \frac{۸}{R_B} \ge ۰/۶۵ \Rightarrow R_B \ge ۱۲/۲ K\Omega$

ب) $V_{BB} - R_B I_{CBO} = ۰ \rightarrow ۲ - ۲۰ I_{CBO} = ۰ \rightarrow I_{CBO} = ۰/۱ mA$

$۰/۱ = ۱۰ \times ۱۰^{-۶} \times ۲^{\frac{T-۲۵}{۱۰}} \rightarrow Ln\, ۱۰^{۴} = \frac{T-۲۵}{۱۰} Ln ۲ \rightarrow T = ۱۵۸°$

۱۲ـ در مدار کلید ترانزیستوری شکل م ـ ۱۲ برای ترانزیستور ۵۰ > β > ۲۰ و در دمای ۲۵°C، $I_{CBO} = ۲۰\, nA$ است.



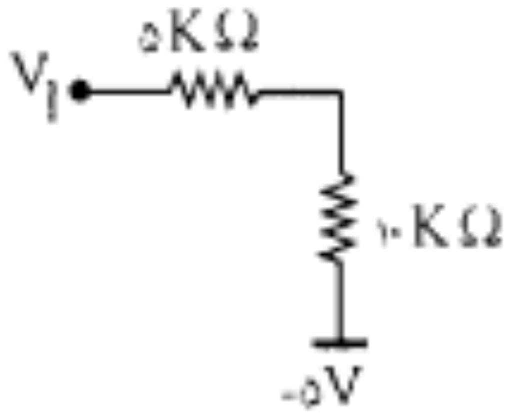
شکل م-۱۲

الف) حداکثر V_I برای اینکه ترانزیستور در دمای ۷۵°C در حالت قطع بماند چه مقدار خواهد بود؟

ب) R_C را طوری تعیین کنید که به ازای $V_I = ۵^V$ و با فرض $|V_{CE(sat)}| = ۰/۲V$ ترانزیستور اشباع شود. این مقدار R_C حداقل است یا حداکثر؟

☑ راه حل:

معادل تونن مدار مقابل را تعیین می‌کنیم.



$V_{th} = -۵ \times \frac{۵}{۵+۱۰} + V_I \times \frac{۱۰}{۱۰+۵} = \frac{۱۰ V_I - ۲۵}{۱۵} = \frac{۲V_I - ۵}{۳}$

$R_{th} = ۱۰^{K\Omega} \parallel ۵^{K\Omega} = \frac{۵۰}{۱۵} = ۳/۳ K\Omega$

$I_{CBO}(۷۵°) = ۲nA \times ۲^{\frac{۷۵-۲۵}{۱۰}} = ۶۴۰\, nA$

الف) در حالت قطع $V_{BE} = ۰^V$

$KVL: V_{th} = ۳/۳ \times ۶۴۰ \times ۱۰^{-۶} = ۰ \rightarrow V_{th} = ۲/۱ \times ۱۰^{-۳} V$

از طرفی: $V_{th} = ۲/۱ \times ۱۰^{-۳} V = \frac{۲V_I - ۵}{۳} \rightarrow ۶/۳ \times ۱۰^{-۳} = ۲V_I - ۵$

$۲V_I = ۶/۳ \times ۱۰^{-۳} + ۵ \rightarrow V_I = ۲/۵۰۳ V$

ب) $V_I = ۵V \rightarrow V_{th} = \frac{۲\times۵ - ۵}{۳} = \frac{۵}{۳} V$

$KVL: -\frac{۵}{۳}V + ۳/۳ I_B + ۰/۷ = ۰ \rightarrow I_B = ۰/۲۹ mA$

$V_{CE} = ۰/۲$ $\quad V_E = ۰ \rightarrow V_C = ۰/۲V$

$V_C = ۵ - R_C I_C = ۰/۲ \Rightarrow ۵ - ۰/۲ = R_C I_C \Rightarrow I_C = \frac{۴/۸}{R_C}$ (1)

$I_{C(sat)} = \beta_{min} I_B = ۲۰ \times ۰/۲۹ = ۵/۸ mA$

www.PnuEB.com

شرط اینکه ترانزیستور در اشباع باشد این است که $V_{CE} \le ۰/۲$ و $I_C = \beta_{min} I_B$ و $I_B \ge I_B(sat)$ پس باید داشته باشیم $\quad I_B \ge \frac{I_C}{\beta_{min}} \quad$ (II)

(I) و (II) با توجه به رابطه $\Rightarrow ۰/۲۹ \ge \frac{۴/۸}{R_C \times ۲۰} \Rightarrow R_C \ge \frac{۱۶/۵۵}{۲۰} = ۰/۸۲ K\Omega$

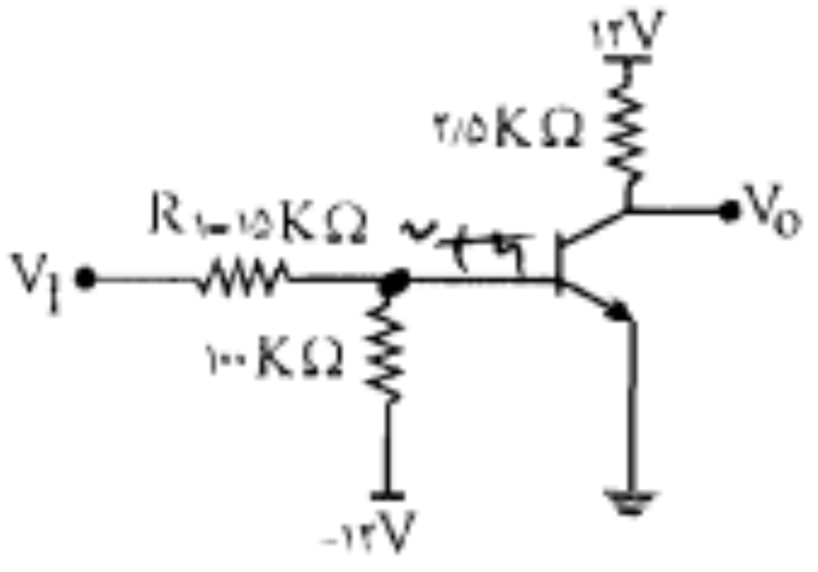
۱۳ـ ترانزیستور سیلکنی مدار شکل م ـ ۱۳ دارای $۵۰ > \beta > ۳۰$ و $I_{CBO} = ۱۰\ nA$ در دمای $۲۵^{o}C$ است. $\left(\left| V_{CE}(sat) \right| \right)$

الف) به ازای $V_I = ۱۲V$، ولتاژ $V_{۰}$ را محاسبه نمایید. ترانزیستور در چه ناحیه‌ای است؟

ب) حداقل مقدار $R_۱$ را که به ازای آن ترانزیستور در ناحیه فعال خواهد بود به دست آورید.

ج) به ازای مقادیر $R_۱ = ۱۵k\Omega$ و $V_I = ۱V$ ترانزیستور در چه ناحیه‌ای کار می‌کند؟ در این صورت $V_{۰}$ را محاسبه نمایید.

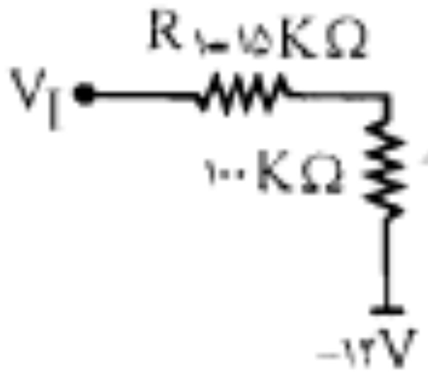
د) با مقادیر مفروض در بند (ج) ترانزیستور تا حداکثر چه دمایی در حالت قطع باقی می‌ماند؟



شکل م-۱۳

☑ راه حل:

الف) ابتدا مدار معادل تونن ورودی را به دست می‌آوریم.



$$V_{th} = V_I \times \frac{۱۰۰}{۱۱۵} + (-۱۲) \times \frac{۱۵}{۱۱۵} = \frac{۱۰۰ V_I - ۱۸۰}{۱۱۵} = \frac{۲۰ V_I - ۳۶}{۲۳}$$

$$R_{th} = ۱۵ \parallel ۱۰۰ = \frac{۱۰۰ \times ۱۵}{۱۱۵} = \frac{۳۰۰}{۲۳}$$

$$V_I = ۱۲V \rightarrow V_{th} = \frac{۲۰ \times ۱۲ - ۳۶}{۲۳} = \frac{۲۰۴}{۲۳}$$

$$KVL: \frac{-۲۰۴}{۲۳} + \frac{۳۰۰}{۲۳} I_B + ۰/۷ = ۰ \rightarrow I_B = ۰/۶۳\ mA$$

$$I_E = (۱ + \beta_{av}) I_B = (۱ + \frac{۳۰ + ۵۰}{۲}) \times ۰/۶۳ = ۲۵/۸ mA$$

$$V_C = ۱۲ - ۲/۲ \times ۲۵/۸ = -۴۴/۷۵ < ۰$$

پس ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد و محاسبات بالا غلط می‌باشد.

$$V_{CE} = ۰/۲V \rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = ۰/۲ \rightarrow V_C - ۰ = ۰/۲ \rightarrow V_{۰} = ۰/۲V$$

ب)

$$I_C = \frac{۱۲ - ۰/۲}{۲/۲} = ۵/۳۶\ mA$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{min}} = ۰/۱۷۸\ mA$$

$$KVL: V_{th} = R_{th} I_B + ۰/۷ \rightarrow$$

$$\frac{۱۲ \times ۱۰۰}{۱۰۰ + R_۱} - \frac{۱۲R_۱}{۱۰۰ + R_۱} = \frac{۱۰۰R_۱}{R_۱ + ۱۰۰} \times ۰/۱۷۸ + ۰/۷$$

$$۱۲۰۰ - ۱۲R_۱ = ۱۰۰R_۱ \times ۰/۱۷۸ + ۰/۷(۱۰۰ + R_۱) \rightarrow ۱۲۰۰ - ۷۰ = ۱۲R_۱ + ۱$$

$$= ۷/۸R_۱ + ۰/۷R_۱$$

$$۱۱۳۰ = ۳۰/۵R_۱ \rightarrow R_۱ = ۳۷/۰۵ k\Omega$$

ج)

$$V_{th} = \frac{۲۰ \times ۱ - ۳۶}{۲۳} = \frac{-۱۶}{۲۳} \qquad R_{th} = \frac{۳۰۰}{۲۳}$$

$$KVL: -\frac{۱۶}{۲۳} = \frac{۳۰۰}{۲۳} \times I_B + ۰/۷ \rightarrow I_B = -۰/۱۰۷ < ۰$$

چون I_B کمتر از صفر می‌باشد پس ترانزیستور در ناحیه قطع می‌باشد پس:

$$I_C = ۰ \quad , \quad V_{۰} = V_{CC} = ۱۲V$$

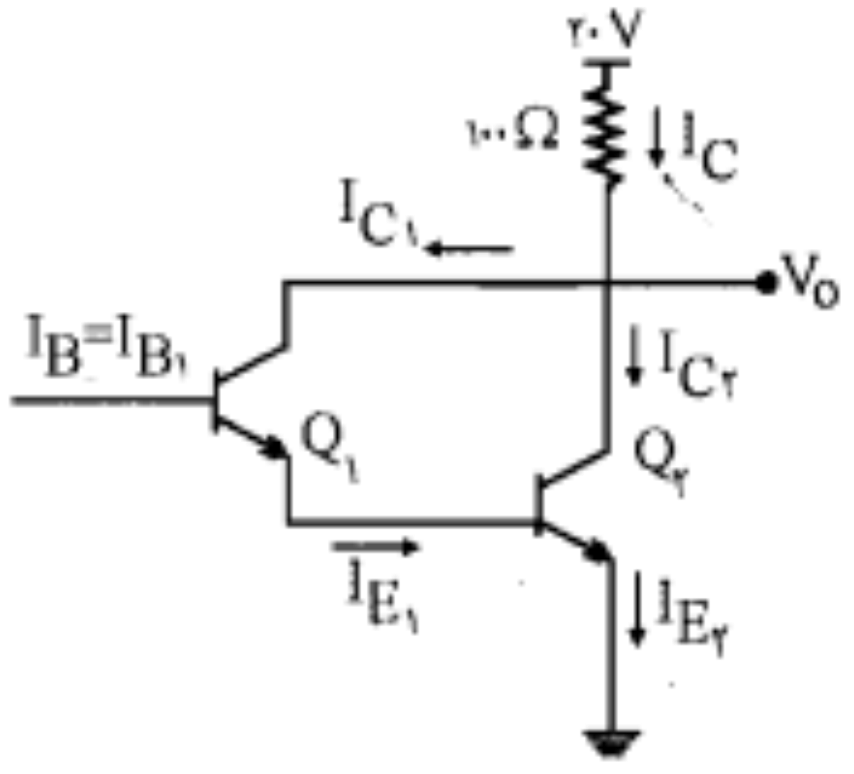
د)

$$-V_{th} = R_{th} I_{CBO} \rightarrow I_{CBO} = \frac{\frac{۱۶}{۲۳}}{\frac{۳۰۰}{۲۳}} = \frac{۱۶}{۳۰۰} = ۰/۰۵۳ mA$$

$$۵۳/۳ \mu A = ۱۰ \times ۱۰^{-۳} \times ۲^{\frac{T_۲ - ۲۵}{۱۰}} \rightarrow Ln\ ۵۳/۳ \times ۱۰۰ = (\frac{T_۲ - ۲۵}{۱۰}) Ln ۲$$

$$\rightarrow T_۲ = ۱۴۹^{oC}$$

۱۴ـ در مدار شکل م ـ ۱۴، $I_{E_۲} = ۱۲۰\ mA$، $\alpha_۲ = ۰/۹۸$ و $\alpha_۱ = ۰/۹۹$ است. با فرض اینکه ترانزیستورها در ناحیه فعال باشند (مدار بایاس رسم نشده است)، جریان‌های $I_{B_۱}$، $I_{E_۱}$، $I_{C_۲}$ و I_C را محاسبه نمایید. ولتاژ $V_{۰}$ چقدر است؟ نسبت جریان‌های $\frac{I_C}{I_B}$ و $\frac{I_C}{I_{E_۲}}$ را محاسبه نمایید.



www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

$I_{E_۲} = ۱۲۰\,mA \rightarrow I_{C_۲} = \alpha_۲ I_{E_۲} = ۰/۹۸ \times ۱۲۰\,mA = ۱۱۷/۶\,mA$

$I_{B_۲} = I_{E_۱}$ $\qquad I_{B_۲} = I_{C_۲} \times \frac{۱ - \alpha_۲}{\alpha_۲} = ۱۱۷/۶ \times \frac{۱ - ۰/۹۸}{۰/۹۸} = ۲/۴\,mA$

$I_{E_۱} = I_{B_۲} = ۲/۴\,mA$

$\rightarrow I_{C_۱} = \alpha_۱ I_{E_۱} = ۰/۹۹ \times ۲/۴ = ۲/۳۷\,mA \rightarrow$ $\qquad I_{B_۱} = I_{C_۱} \times \frac{۱ - \alpha_۱}{\alpha_۱} = ۲۴\,\mu A$

$I_C = I_{C_۱} + I_{C_۲} = ۲/۳۷ = ۲/۳۷ + ۱۱۷/۶ = ۱۱۹/۹۷\,mA$

$V_۰ = ۲۰ - ۰/۱ I_C = ۲۰ - ۰/۱ \times ۱۱۹/۹۷ = ۸/۰۰۳\,V$

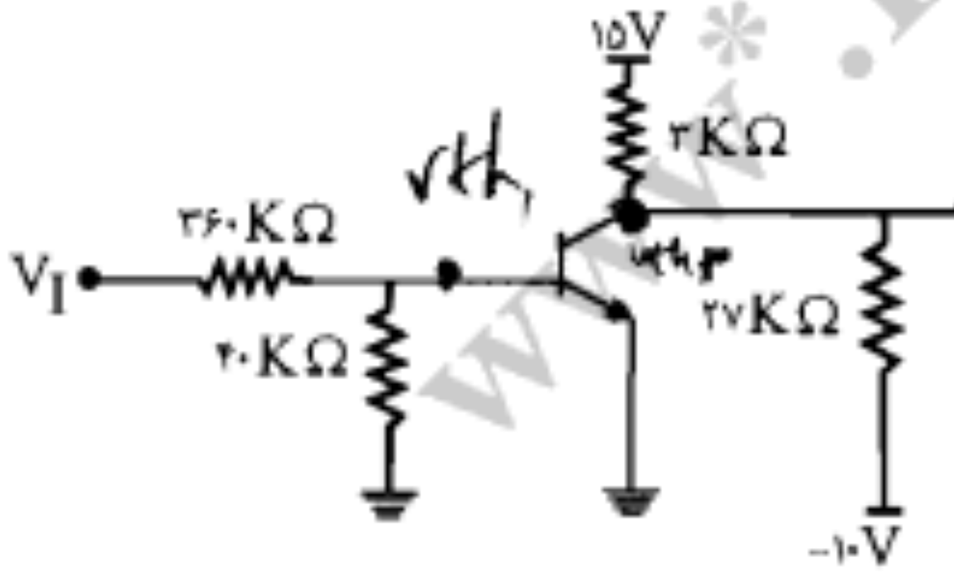
$\frac{I_C}{I_B} = \frac{۱۱۹/۹۷}{I_{B_۱}} = \frac{۱۱۹/۹۷\,mA}{۲۴\,\mu A} = ۴۹۹۸/۷۵$

$\frac{I_C}{I_{E_۲}} = \frac{۱۱۹/۹۷}{۱۲۰} = ۰/۹۹$

۱۵ـ در مدار شکل م ـ ۱۵، ۴۰ = β است. مطلوب است محاسبه $V_۰$:

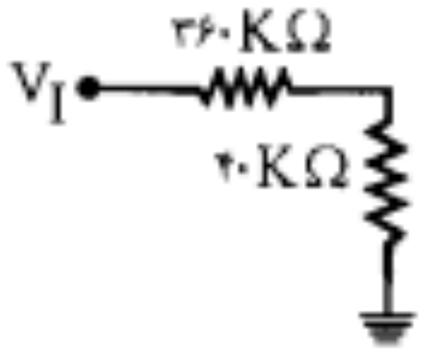
الف) اگر $V_I = ۱۵V$ باشد.

ب) اگر $V_I = ۳۰V$ باشد.



☑ **راه حل:**

مدار معادل تونن ورودی را می‌نویسیم:



$V_{th} = V_I \times \frac{۴۰}{۴۰۰} = \frac{V_I}{۱۰}$

$R_{th} = \frac{۴۰ \times ۳۶۰}{۴۰ + ۳۶۰} = ۳۶\,K\Omega$

و مدار معادل کلکتور هم به صورت زیر می‌باشد:

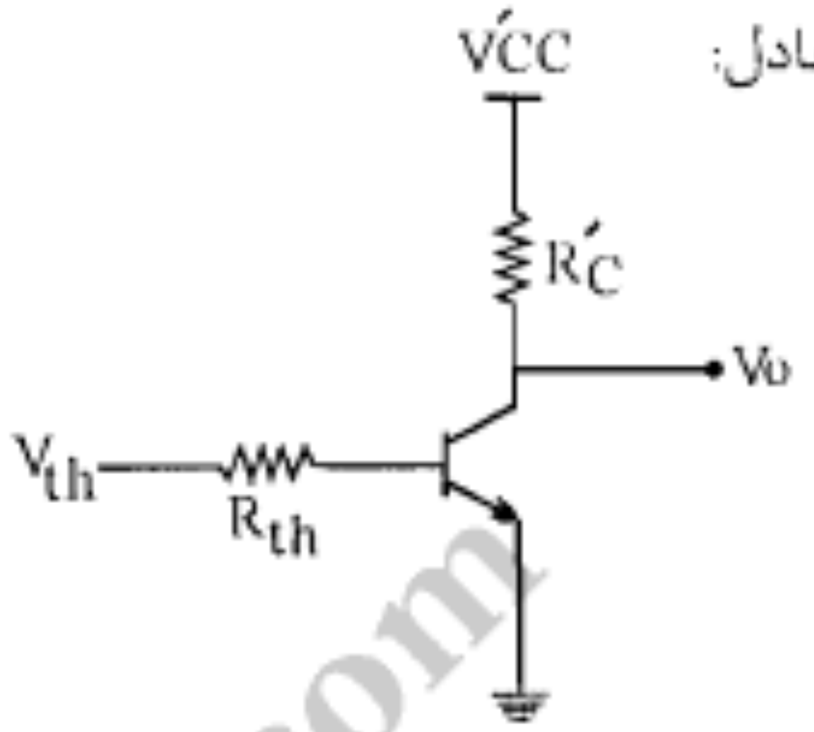
$V'_{CC} = ۵ \times \frac{۲۷}{۲۷ + ۳} + \frac{(-۱۰) \times ۳}{۳ + ۲۷} = \frac{۲۷}{۶} - ۱ = \frac{۲۱}{۶} = ۳/۵V$

$R'_C = ۳K\Omega \parallel ۲۷K\Omega = \frac{۳ \times ۲۷}{۳ + ۲۷} = ۲/۷\,K\Omega$

الف)

$V_I = ۱۵V \rightarrow \begin{cases} V_{th} = ۱/۵V \\ R_{th} = ۳۶K\Omega \end{cases} \quad \begin{cases} V'_{CC} = ۳/۵V \\ R'_C = ۲/۷K\Omega \end{cases}$

مدار معادل:



KVL: $V_{th} = ۳۶ I_B + ۰/۷ = ۱/۵V \rightarrow I_B = ۲۲\,\mu A$

$I_C = \beta I_B = ۴۰ \times ۲۲\,\mu A = ۰/۸۸\,mA$

$V_۰ = ۳/۵ - ۲/۷ \times ۰/۸۸ = ۱/۱۲۴\,V$

ب)

$V_I = ۳۰V \rightarrow \begin{cases} V_{th} = ۳V \\ R_{th} = ۳۶K\Omega \end{cases} \quad \begin{cases} V'_{CC} = ۳/۵V \\ R'_C = ۲/۷K\Omega \end{cases}$

KVL: $۳ = ۳۶ I_B + ۰/۷ \rightarrow I_B = ۶۳/۸\,\mu A$

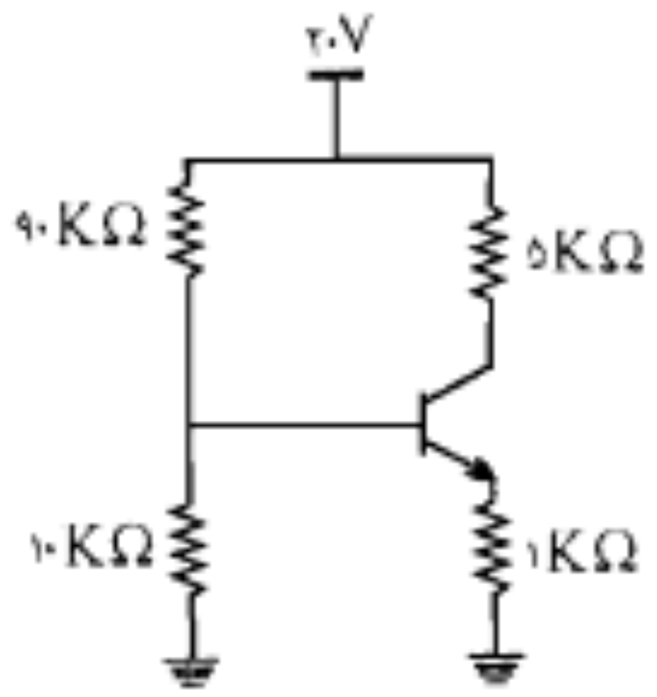
$I_C = ۴۰ \times ۶۳/۸\,\mu A = ۲/۵۵\,mA$

$V_۰ = ۳/۵ - ۲/۷ \times ۲/۵۵ = -۳/۳۶$

پس ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد پس محاسبات انجام شده غلط می‌باشد.

$V_{CE} = ۰/۲V \rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = V_C - ۰ = ۰/۲ \rightarrow V_۰ = ۰/۲V$

۱۶ـ در مدار شکل م ـ ۱۶، ۵۰ = β است. جریان‌های کلکتور و بیس را محاسبه نمایید.



$V_{th} = ۲۰ \times \frac{۱۰}{۱۰ + ۹۰} = ۲۰ \times \frac{۱۰}{۱۰۰} = ۲V$

$R_{th} = ۱۰K\Omega \parallel ۹۰K\Omega = \frac{۱۰ \times ۹۰}{۱۰ + ۹۰} = ۹K\Omega$

$V_{th} = R_{th} I_B + V_{BE} + R_E I_E$

$\rightarrow ۲V = ۹ I_B + ۰/۷ + ۱ \times (۱ + \beta) I_B \rightarrow ۱/۳ = ۶۰ I_B \rightarrow I_B = ۲۱/۷\,\mu A$

$I_C = \beta I_B = ۵۰ \times ۲۱/۷\,\mu A = ۱/۰۸۵\,mA$

$V_{CE} = ۲۰ - (۵ + ۱) \times ۱/۰۸۵ = ۱۳/۴۹^V$

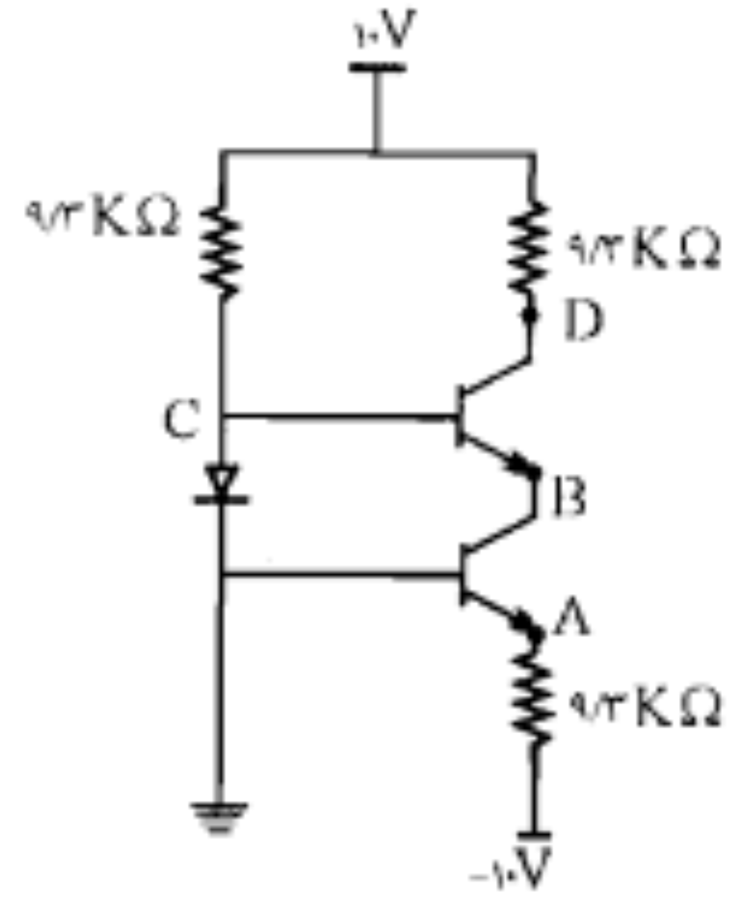
پس ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد.

www.PnuEB.com
www.PnuEB.com

۱۷ ـ در مدار شکل م ـ ۱۷ برای ترانزیستورها $V_{BE} = ۰/۷V$ و برای دیـود $V_\gamma = ۰/۷V$ است. مطلوبست محاسبه ولتاژ نقاط A و B و C و D با فرض

الف) $\beta = \infty$

ب) $\beta = ۱۰$



☑ راه حل:

الف) $\beta = \infty$

$I_B = ۰$

$V_C = ۰ + ۰/۷ = ۰/۷V$

$V_A = ۰ - ۰/۷ = -۰/۷$ $\qquad V_B = V_C - ۰/۷ = ۰V$

$V_D = ۱۰ - ۹/۳ \times I_C$

$I_{C_۱} = I_{E_۲} = \frac{۱۰ - ۰/۷}{۹/۳} = ۱mA \to V_D = ۱۰ - ۹/۳ = ۰/۷V$

ب) $\beta = ۱۰$

$V_C = ۰ + ۰/۷ = ۰/۷V$ $\qquad V_A = ۰ - ۰/۷ = -۰/۷V$

$V_B = V_C - ۰/۷ = ۰V$

$I_{E_۲} = \frac{۱۰ - ۰/۷}{۹/۳} = ۱mA$ $\qquad I_{C_۲} = I_{E_۲} \times \frac{\beta}{۱+\beta} = \frac{۱۰}{۱۱} mA$

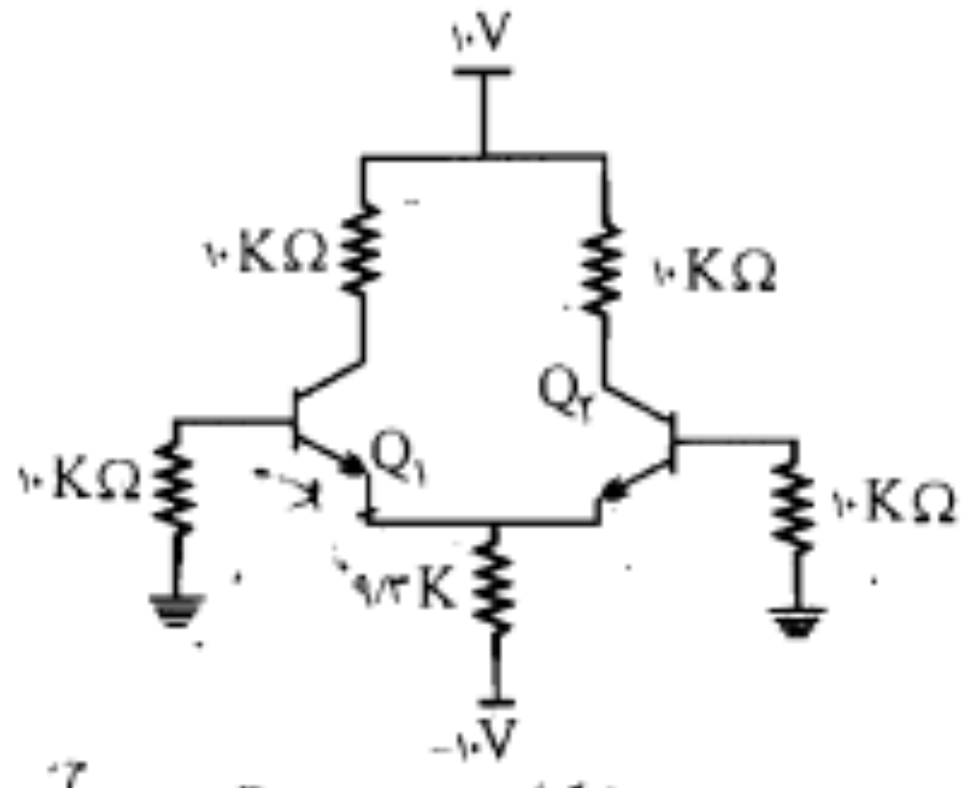
$I_{C_۱} = I_{E_۱} = I_{C_۲} \times \frac{\beta}{۱+\beta} = \frac{۱۰۰}{۱۲۱} mA$

$V_D = ۱۰ - ۹/۳ \times \frac{۱۰۰}{۱۲۱} = ۲/۳۱۴V$

۱۸ ـ در مدار شکل م ـ ۱۸ ترانزیستورها کاملاً مشابه و دارای $V_{BE} = ۰/۷V$ هستند. ولتاژ کلکتور ترانزیستورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ را برای حالت‌های زیر محاسبه نمایید:

الف) $\beta_۱ = \beta_۲ = \infty$

ب) $\beta_۱ = \beta_۲ = ۱۰۰$



شکل م ـ ۱۸

☑ راه حل:

الف) $\beta_۱ = \beta_۲ = \infty$

به علت تقارن دو ترانزیستور $Q_۱$ و $Q_۲$ داریم:

$I_{E_۱} = I_{E_۲}$

$KVL: ۱۰I_{B_۱} + V_{BE_۱} + ۹/۳K\Omega(I_{E_۱} + I_{E_۲}) - ۱۰ = ۰$

$\to ۱۰ \times \frac{I_{E_۱}}{\infty} + ۰/۷ + ۹/۳ \times ۲I_{E_۱} - ۱۰ = ۰ \to ۹/۳ = ۲I_{E_۱} \times ۹/۳ \to I_{E_۱} = I_{E_۲} = ۰/۵mA$

$I_{C_۱} = I_{C_۲} = I_E \to V_{C_۱} = V_{C_۲} = ۱۰ - ۱۰ \times I_{E_۱} = ۱۰ - ۱۰ \times ۰/۵ = ۵V$

ب) $\beta_۱ = \beta_۲ = ۱۰۰$

$KVL: ۱۰ \times \frac{I_{E_۱}}{۱۰۰} + ۰/۷ + ۰/۳ \times ۲I_{E_۱} - ۱۰ = ۰ \to ۹/۳ = ۱۸/۷I_{E_۱} \to$

$I_{E_۱} = I_{E_۲} = ۰/۴۹ mA$

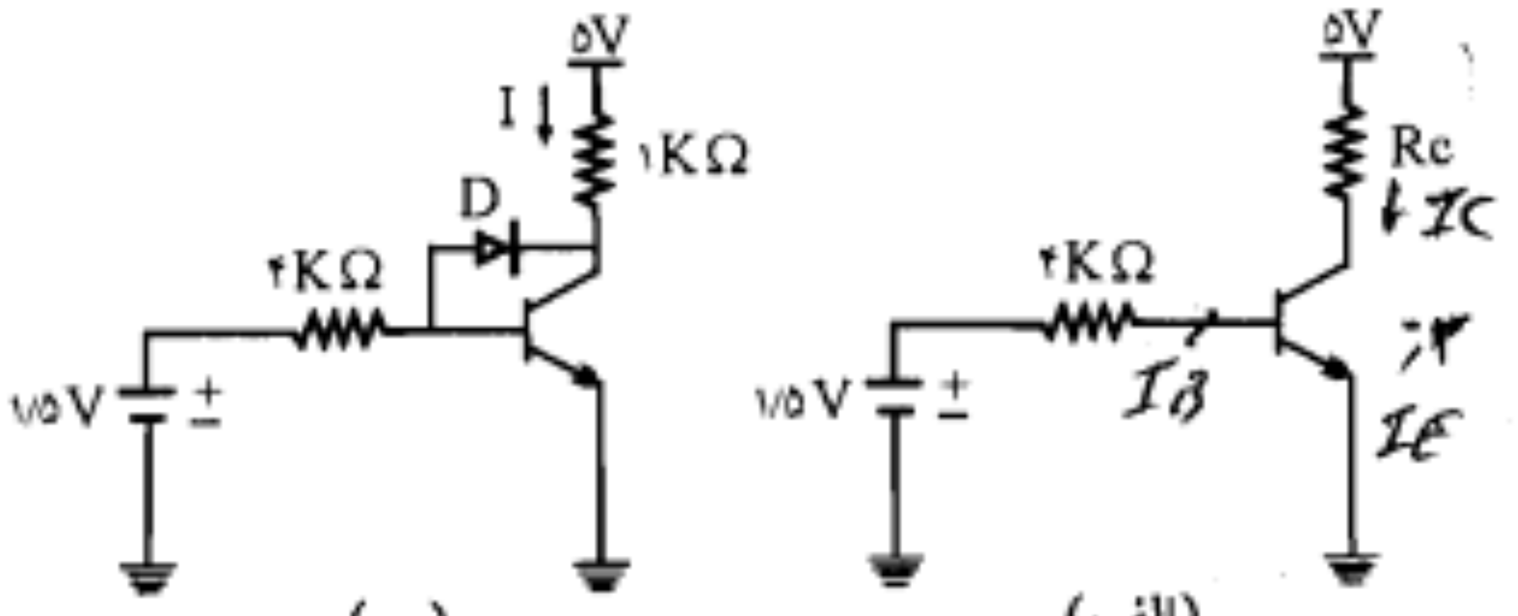
$I_{C_۱} = I_{C_۲} = I_E \times \frac{\beta}{۱+\beta} = ۰/۴۹ \times \frac{۱۰۰}{۱۰۱} = ۰/۴۸mA$

$V_{C_۱} = V_{C_۲} = ۱۰ - ۱۰ \times ۰/۴۸ = ۵/۲V$

۱۹ ـ در مدار شکل م ـ ۱۹ برای ترانـزیستور، $\beta = ۴۸$ و $V_{BE} = ۰/۷V$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ است.

الف) در مدار شکل م‌ـ۱۹الف، R_C را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در مرز اشباع قرار گیرد.

ب) در شکل م ـ ۱۹ ـ ب،



(ب) (الف)

شکل م ـ ۱۹

دیود D را به مدار اضافه و $R_C = ۱K\Omega$ انتخاب شود. $V_\gamma = ۰/۳V$ باشد و V_{CE} و I چقدر خواهند بود؟ ترانزیستور چه وضعیتی دارد؟ نقش دیود D چیست؟

☑ **راه حل:**

الف) برای اینکه ترانزیستور در مرز اشباع قرار گیرد باید $V_{CE} = ۰/۲V$ در نظر گرفته شود.

KVL: $-۱/۵ + ۴I_B + ۰/۷ = ۰ \rightarrow I_B = \frac{۰/۸}{۴} = ۰/۲mA$

$I_C = \beta I_B = ۴۸ \times ۰/۲ = ۹/۶mA$

$V_{CE} = ۰/۲V \rightarrow -۵ + R_C I_C + ۰/۲ = ۰ \rightarrow R_C = \frac{۴/۸}{۹/۶} = ۰/۵K\Omega$

ب) $V_C = ۵ - R_C I_C = ۵ - ۱\times ۹/۶ = -۴/۶ < ۰$

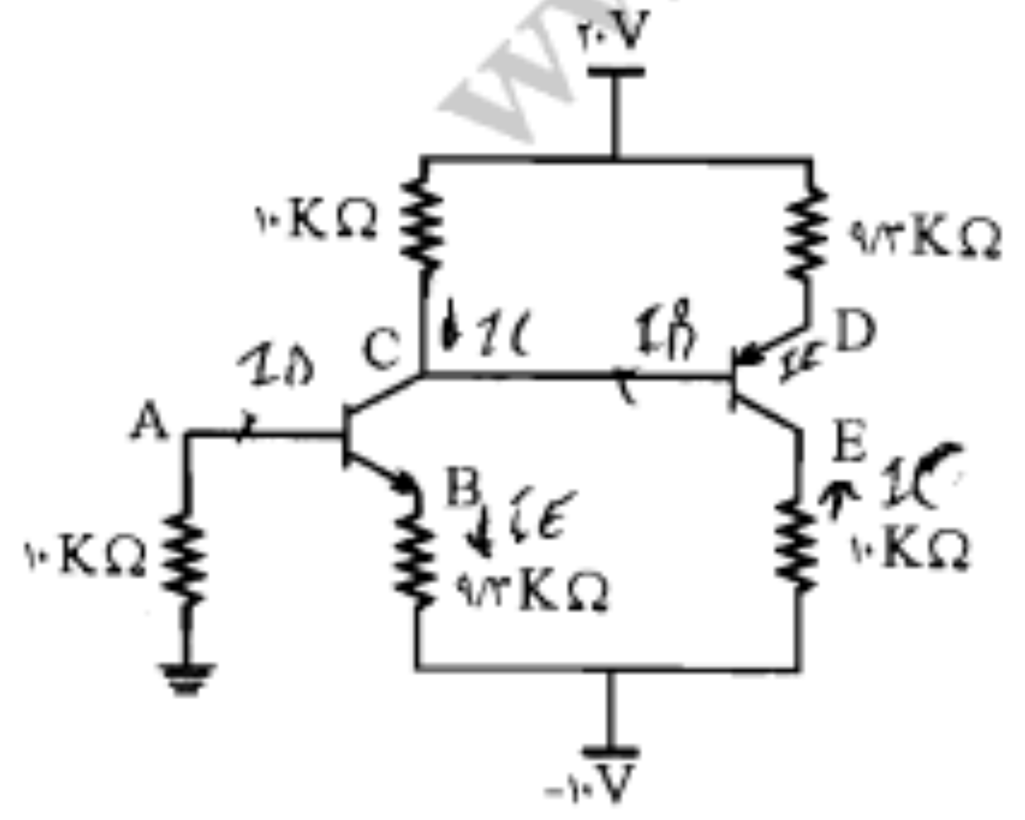
پس ترانزیستور در حالت اشباع قرار خواهد گرفت اما به علت وجود دیود ولتاژ کلکتور بیشتر از ۰/۳ ولت از ولتاژ بیس کمتر نمی‌شود.

$V_E = ۰ \qquad V_B = ۰ + ۰/۷ - ۰/۷ \qquad V_C = ۰/۷ - ۰/۳ = ۰/۴$

$V_{CE} = V_C - V_E = ۰/۴V \rightarrow I = \frac{۵ - ۰/۴}{۱K\Omega} = ۴/۶ mA$

در این حالت ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد و نقش دیود جلوگیری از به اشباع رفتن ترانزیستور می‌باشد.

۲۰ـ در مدار شکل م ـ ۲۰، برای هر یک از ترانزیستورها $V_{BE} = ۰/۷V$ است. با فرض $\beta = \infty$ مقادیر ولتاژ نقاط A، B، C، D، E را پیدا کنید.



شکل م ـ ۲۰

☑ **راه حل:**

وقتی $\beta = \infty$ باشد I_B صفر می‌شود.

$I_B = ۰ \rightarrow V_A = ۰V \qquad V_B = ۰ - ۰/۷V = -۰/۷V$

$I_{C_1} = I_{E_1} = \frac{۱۰ - ۰/۷}{۹/۳} = ۱mA \rightarrow V_C = ۲۰ - ۱۰I_{C_1} = ۲۰ - ۱۰ = ۱۰V$

$V_D = ۰ + ۰/۷ = ۰/۷V$

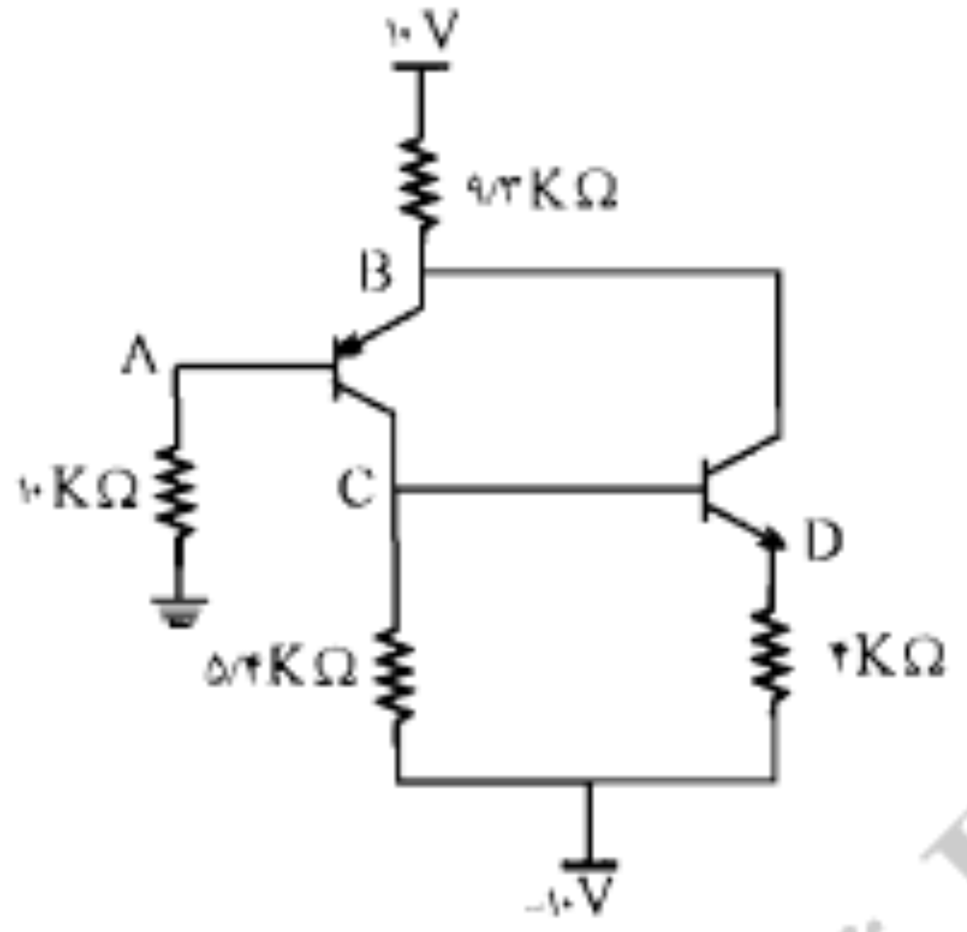
$I_{C_2} = I_{E_2} = \frac{۲۰ - ۱۰ - ۰/۷}{۱۹/۳} = ۰/۴۸mA$

$V_E = -۱۰ - ۱۰ \times ۰/۴۸ = -۱۴/۸V$

۲۱ـ در مدار شکل م ـ ۲۱ ترانزیستورها مشابه بوده و برای هر یک از آنها $|V_{BE}| = ۰/۷$ است. ولتاژ نقاط A، B، C، D را به‌دست آورید. اگر:

الف) $\beta = \infty$

ب) $\beta = ۱۰۰$



شکل م ـ ۲۱

☑ **راه حل:**

الف) $\beta = \infty$

$I_B = ۰ \rightarrow V_A = ۰ \qquad V_B = ۰ + ۰/۷ = ۰/۷V$

$I = \frac{۱۰ - ۰/۷}{۹/۳} = ۱mA = I_{C_1} + I_{C_2} \rightarrow I_{C_1} = ۱ - I_{C_2}$ (I)

KVL: $۵/۴I_{C_1} = ۰/۷ + ۴I_{C_2}$ (II)

با قرار دادن (I) در رابطه (II): $۵/۴(۱ - I_{C_2}) = ۰/۷ + ۴I_{C_2} \rightarrow ۵/۴ - ۴/۵I_{C_2} = ۰/۷ + ۴I_{C_2}$

$\rightarrow I_{C_2} = ۰/۵mA \rightarrow I_{C_1} = ۱ - I_{C_2} = ۰/۵mA$

$V_C = -۱۰ + ۵/۴ \times ۰/۵ = -۷/۳V$

$V_D = -۷/۳ - ۰/۷ = -۸/۳V$

ب) $\beta = ۱۰۰$

KVL: $-۱۰ + ۹/۳(I_{C_1} + I_{C_2}) + ۰/۷ + ۱۰\frac{I_{C_1}}{۱۰۰} = ۰$

با تقریب $\begin{cases} I_{C_2} = I_{E_2} \\ I_{C_1} = I_{E_1} \end{cases}$

www.*PnuEB*.com

$$KVL: ۵/۴(I_{C_۱} - I_{B_۲}) = ۰/۷ + ۴I_{C_۲} \quad , \quad I_{B_۲} = \frac{I_{C_۲}}{\beta} = \frac{I_{C_۲}}{۱۰۰}$$

$$\rightarrow \begin{cases} -۱۰ + ۹/۳I_{C_۱} + ۹/۳I_{C_۲} + ۰/۷ + ۰/۱I_{C_۱} = ۰ \\ ۵/۴I_{C_۱} - ۰/۰۵۴I_{C_۲} = ۰/۷ + ۴I_{C_۲} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} ۹/۴I_{C_۱} + ۹/۳I_{C_۲} = ۹/۳ \\ ۵/۴I_{C_۱} - ۴/۰۵۴I_{C_۲} = ۰/۷ \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_{C_۱} = ۰/۵mA \\ I_{C_۲} = ۰/۴۹mA \end{cases}$$

$$I_{B_۱} = \frac{I_{C_۱}}{\beta} = ۵ \times ۱۰^{-۳}mA$$

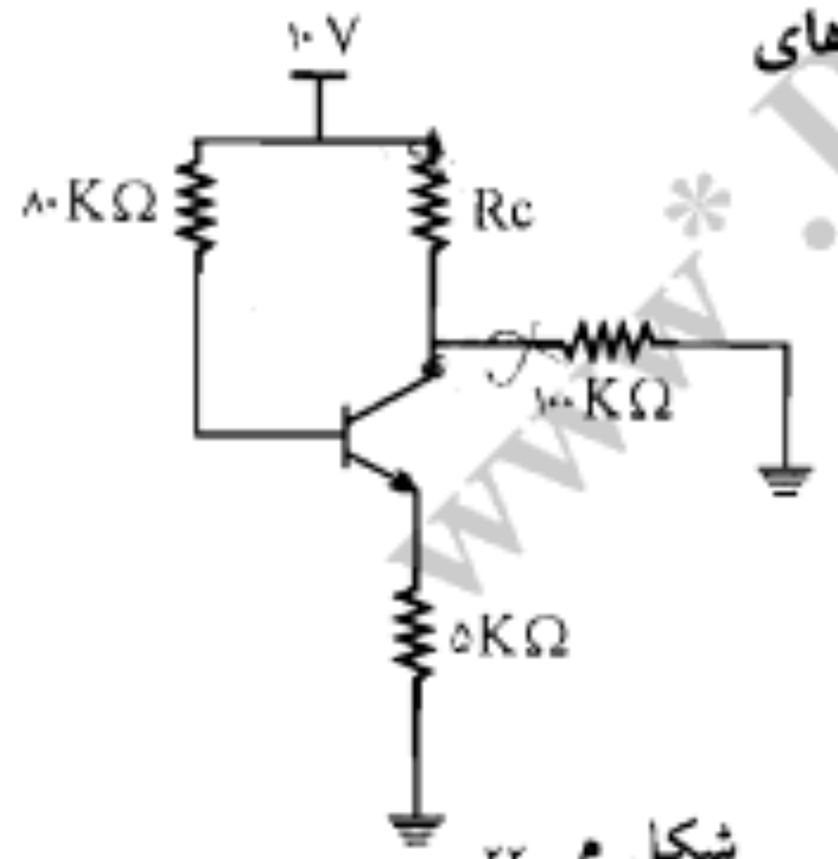
$$V_A = ۱۰I_{B_۱} = ۰/۰۵V \qquad V_B = V_A + ۰/۷V = ۰/۷۵V$$

$$V_D = -۱۰ + ۴I_{C_۲} = -۸/۰۴ \qquad V_C = V_D + ۰/۷ = -۷/۳۴V$$

۲۲ ـ در مدار شکل م ـ ۲۲ با فرض ۱۰۰ = β، $V_{BE}(ON) = ۰/۷V$ و $V_{CE(sat)} = ۰/۲V$

الف) به ازای $R_C = ۵K\Omega$ ولتاژها و جریان‌های پایه‌های ترانزیستور را محاسبه کنید.

ب) مقدار R_C را طوری تعیین کنید که $V_{CE} = ۱V$ شود.



شکل م ـ ۲۲

☑ **راه حل:**

الف)

$$KVL: -۱۰ + ۸۰I_B + ۰/۷ + ۵I_E = ۰ \qquad I_E = (۱+\beta)I_B$$

$$\rightarrow -۱۰ + ۸۰I_B \; ۰/۷ + ۵ \times ۱۰۱I_B = ۰ \rightarrow ۵۸۵I_B = ۹/۳$$

$$\rightarrow I_B = ۱۵/۸۹\mu A$$

$$I_E = ۱۰۱I_B = ۱۰۱ \times ۱۵/۸۹\mu A = ۱/۶ mA$$

$$V_E = ۵ \times ۱/۶mA = ۸V \qquad V_B = ۸ + ۰/۷ = ۸/۷V$$

مدار معادل کلکتور به صورت زیر می‌باشد:

$$V'_{CC} = ۱۰ \times \frac{۱۰۰}{۱۰۰ + R_C} = ۱۰ \times \frac{۱۰۰}{۱۰۵} = ۹/۵۲ V$$

$$R_{th} = R_C \parallel ۱۰۰K\Omega = \frac{۵ \times ۱۰۰}{۵ + ۱۰۰} = ۴/۷۶ K\Omega$$

$$V_C = V_{th} - R_{th}I_C = ۹/۵۲ - ۴/۷۶ \times ۱/۵۸۹ = ۱/۹۶ V$$

ب)

$$V_{CE} = ۱V$$

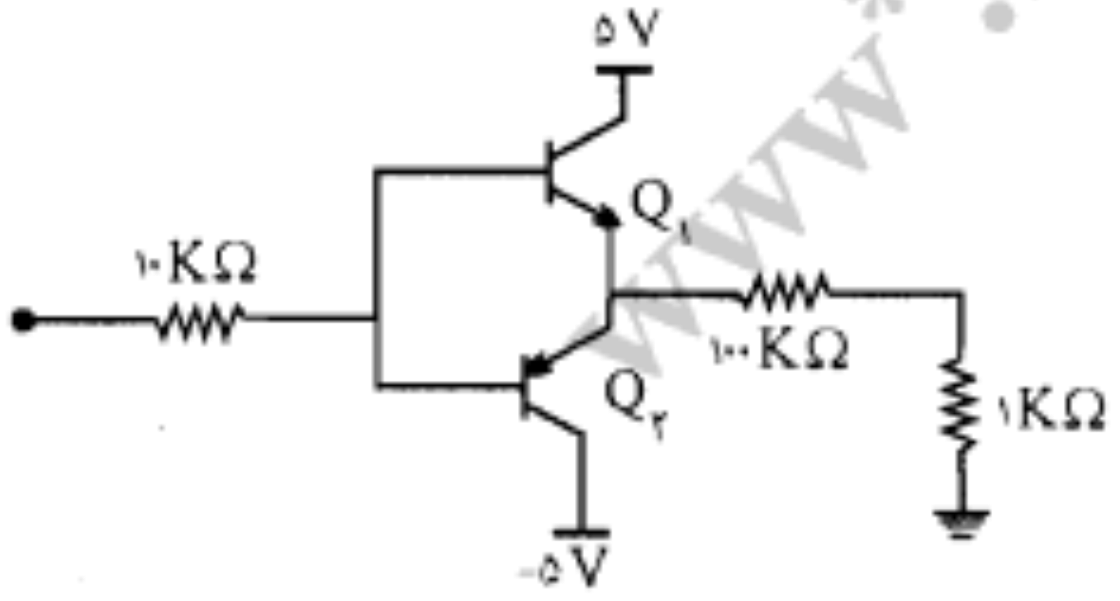
$$KVL: -V'_{CC} + R_{th}I_C + V_{CE} + ۵I_E = ۰$$

$$\rightarrow -۱۰ \times \frac{۱۰۰}{۱۰۰ + R_C} + \frac{۱۰۰R_C}{۱۰۰ + R_C} \times ۱/۵۸۹ + ۱V + ۵ \times ۱/۶ = ۰$$

$$-۱۰۰۰ + ۱۰۰R_C \times ۱/۵۸۹ + ۹(۱۰۰ + R_C) = ۰ \rightarrow$$

$$۱۰۰ = ۹R_C + ۱۵۸/۹R_C \rightarrow R_C = ۰/۵۹ K\Omega$$

۲۳ ـ در مدار شکل م ـ ۲۳ برای $V_I = \pm ۵V$ و ۱۰۰ = β و $|V_{BE}| = ۰/۷V$، نقطه کار ترانزیستورها را به دست آورید.



شکل م ـ ۲۳

☑ **راه حل:**

$$V_I = ۵V \rightarrow \begin{cases} Q_۱ = ON \\ Q_۲ = Off \end{cases}$$

$$I_{E_۱} = \frac{۵ - ۰/۷}{۱ + \frac{۱۰}{۱۰۱}} = ۳/۹ mA \simeq I_{C_۱}$$

در اینجا ابتدا مقاومت R_B را به امیتر انتقال می‌دهیم یعنی مقدار R_B در امیتر برابر می‌شود با

$$\frac{۱۰}{۱۰۱} = \frac{۱۰}{۱ + \beta}$$

www.PnuEB.com

$V_{CE} = ۵ - ۱ \times I_{E_۱} = ۵ - ۳/۹ = ۱/۱V$

$$Q_۱ \text{ نقطه کار} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_۱} = ۳/۹\,mA \\ V_{CE_۱} = ۱/۱V \end{cases}$$

$$V_I = -۵V \rightarrow \begin{cases} Q_۱ : Off \\ Q_۲ : ON \end{cases}$$

$$I_{E_۲} = \frac{۵ - ۰/۷}{۱ + \frac{۱۰}{۱۰۱}} = ۳/۹\,mA \simeq I_{C_۲}$$

$V_{CE} = -۵ + ۱ \times I_{E_۲} = -۵ + ۳/۹ = -۱/۱V$

$$Q_۲ \text{ نقطه کار} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_۲} = ۳/۹\,mA \\ V_{CE_۲} = -۱/۱V \end{cases}$$

۲۴ـ مسأله ۲۳ را به ازای ولتاژ ورودی ۷ ولت حل کنید.

☑ **راه حل:**

KVL در حلقه ۱KΩ و $V_{BE_۱}$ و ۱۰KΩ و V_I : $۱۰I_{۱۰K} + ۱ \times I_{۱K\Omega} = V_I - V_{BE_۱}$

ترانزیستورها در ناحیه active در نظر گرفته می‌شوند:

$۱۰(I_{B_۱} - I_{B_۲}) + ۱(I_{E_۱} - I_{E_۲}) = ۷ - ۰/۷ = ۶/۳ \Rightarrow ۱۰I_{B_۱} + (۱+\beta)I_{B_۱} - ۱۰I_{B_۲} - (۱+\beta)I_{B_۲} = ۶/۳$

$\Rightarrow ۱۱۱I_{B_۱} - ۱۱۱I_{B_۲} = ۶/۳$ $\quad : \beta = ۱۰۰$

KVL در حلقه ۱KΩ و $V_{BE_۲}$ و ۱۰KΩ و V_I

$۱۰I_{۱۰K\Omega} + ۱I_{۱K\Omega} = V_I + V_{EB_۲} = ۷ + ۰/۷ = ۷/۷ \Rightarrow$

$۱۱۱I_{B_۱} - ۱۱۱I_{B_۲} = ۷/۷$

در این دو معادله به دست آمده دیده می‌شود که طرف اول برابر ولی طرف دوم متفاوت می‌باشند پس دو ترانزیستور با هم نمی‌توانند روشن باشند و $Q_۲$ را در حالت قطع در نظر می‌گیریم خواهیم داشت:

$I_{B_۲} = I_{E_۲} = ۰$ و معادله اول چنین می‌شود: $۱۱۱I_{B_۱} = ۶/۳ \Rightarrow I_{B_۱} = \frac{۶/۳}{۱۱۱}$

$I_{E_۱} = (۱+\beta)I_{B_۱} = ۱۰۱ \times \frac{۶/۳}{۱۱۱} = ۵/۷۳mA$

$V_{CE_۱} = V_{C_۱} - V_{E_۱} = ۵ - ۱ \times I_{E_۱} = -۰/۷۳$

پس $Q_۱$ نمی‌تواند فعال باشد چون $V_{CE} < ۰/۲^V$ به دست آمد پس $Q_۱$ در حالت اشباع می‌باشد و داریم $V_{CE_۱} = ۰/۲$

KVL در حلقه ۵KΩ و $V_{CE_۱}$ و ۱KΩ : $۱ \times I_{E_۱} = ۵ - V_{CE_۱} = ۵ - ۰/۲ \Rightarrow I_{E_۱} = ۴/۸mA$

در حلقه ۱۰KΩ و V_I و $V_{BE_۱}$ و ۱KΩ : $۱۰I_{B_۱} + ۱I_{E_۱} = V_I - V_{BE_۱} \Rightarrow ۱۰I_{B_۱} + ۱ \times ۴/۸$

$= ۷ - ۰/۷I_{B_۱} = ۰/۱۵mA \Rightarrow V_{E_۱} = V_{E_۲} = ۱ \times I_{E_۱} = ۱ \times ۴/۸ = ۴/۸V$

$V_{BE_۱} = V_{B_۱} - V_{E_۱} = ۰/۷ \Rightarrow V_{B_۱} = ۰/۷ + V_{E_۱} = ۵/۵V$

$V_{B_۲} = V_{B_۱} = ۵/۵V$

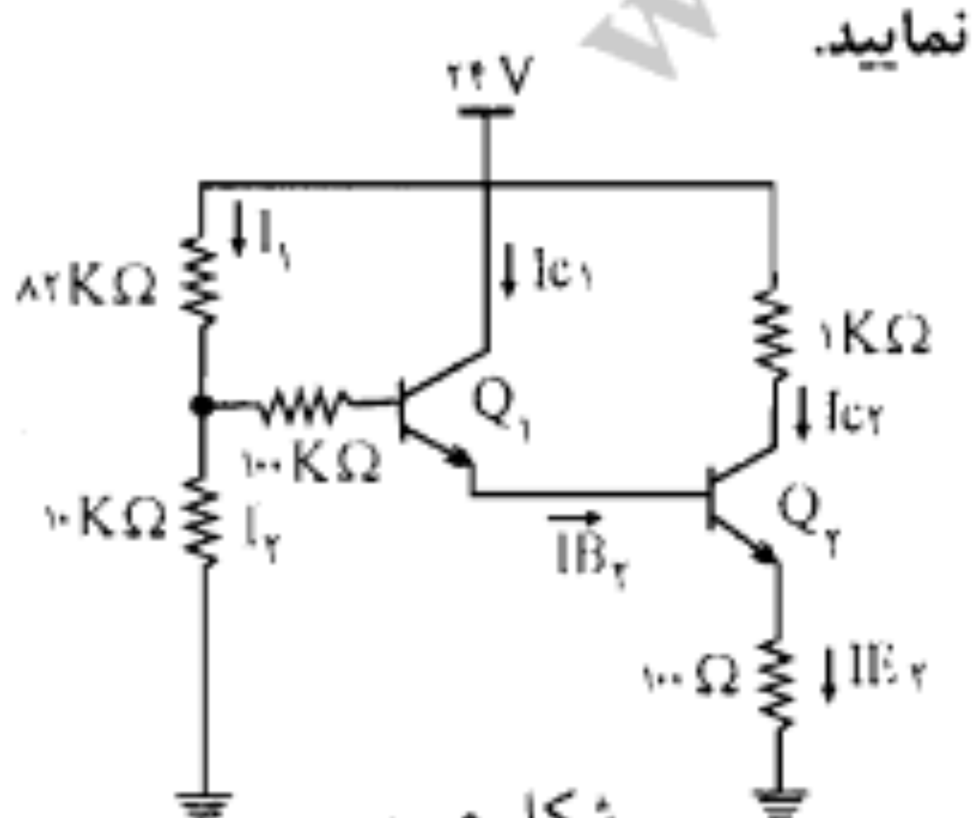
و با این V_{EB} مشخص می‌شود که $Q_۲$ در حالت قطع قرار دارد پس نقطه کار ترانزیستور به صورت زیر می‌باشد:

$I_{B_۱} = ۰/۱۵mA$
$I_{E_۱} = ۴/۸mA$ $\qquad I_{B_۲} = ۰$
$I_{C_۱} = ۴/۸ - ۰/۱۵ = ۴/۶۵mA$ $\qquad$ و $I_{E_۲} = ۰$
$V_{CE_۱} = ۰/۲V$ $\qquad I_{C_۲} = ۰$

۲۵ـ در مدار شکل م ـ ۲۵ ترانزیستورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ در ناحیه فعال کار می‌کنند. $V_{BE_۱} = V_{BE_۲} = ۰/۷V$ ، $\beta_۱ = ۱۰۰$ و $\beta_۲ = ۵۰$ و از جریان اشباع معکوس صرفنظر می‌شود.

الف) جریان‌های $I_{B_۲}$ ، $I_۱$ ، $I_{C_۲}$ ، $I_{C_۱}$ و $I_{E_۲}$ را محاسبه نمایید.

ب) ولتاژ $V_{C_۲}$ و $V_{E_۲}$ را پیدا کنید.



شکل م ـ ۲۵

☑ **راه حل:**

الف) ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می‌یابیم:

$$V_{th} = ۲۴ \times \frac{۱۰}{۱۰ + ۸۲} = ۲/۶V$$

$$R_{th} = ۸۲K\Omega \parallel ۱۰K\Omega + ۱۰۰K\Omega = ۱۰۹/۹K\Omega$$

www.PnuEB.com

I_{E_2} وقتی به بیس ترانزیستور منتقل شود در $(1+\beta_1)$ و $(1+\beta_2)$ ضرب می‌شود.

$$KVL: -V_{th}+R_{th}I_{B_1}+0/7+0/1\times(1+\beta_2)\times(1+\beta_1)I_{B_1}+0/7=0$$

$$\to -2/6+108/9I_{B_1}+1/4+0/1\times101\times51\times I_{B_1}=0$$

$$1/2=624I_{B_1}\to I_{B_1}=1/92\,\mu A$$

$$I_{E_1}=I_{B_2}=(1+\beta_1)I_{B_1}=51I_{B_1}=1\times1/92\,\mu A=97/92\,\mu A$$

$$I_{C_1}=\beta_1 I_{B_1}=50\times1/92\,\mu A=96\,\mu A$$

$$I_{C_2}=\beta_2 I_{B_2}=100\times97/92\,\mu A=9/792\,mA$$

$$I_{E_2}=(1+\beta_2)I_{B_2}=101\times97/92\,\mu A=9/89\,mA$$

ب)

$$\begin{cases}I_1=?\\ I_2=?\end{cases}\qquad KVL:\begin{cases}-24+82I_1+10I_2=0\\ I_1-I_2=I_{B_1}=1/92\,\mu A\to I_1=1/92\,\mu A+I_2\end{cases}$$

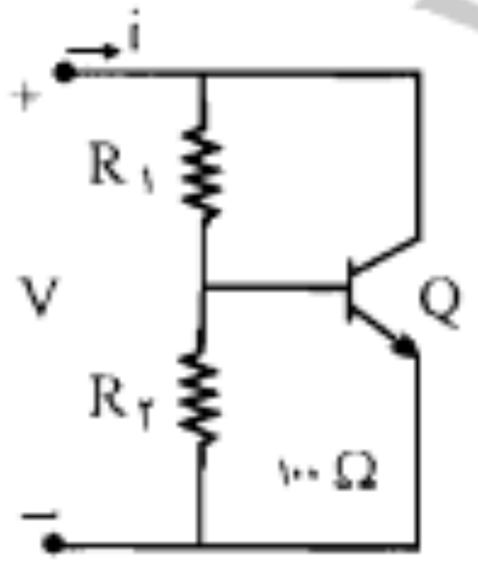
$$\to -24+82(I_2+1/92\times10^{-3})+10I_2=0\to I_2=0/26\,mA$$

$$I_1=0/26\,mA+1/92\times10^{-3}=0/261\,mA$$

$$V_{C_2}=24-1K\Omega\times I_{C_2}=24-9/792=14/208V$$

$$V_{E_2}=0/1I_{E_2}=0/1\times9/89=0/989\,V$$

۲۶ـ در مدار شکل م ـ ۲۶ با فرض فعال بودن ترانزیستور، رابطه V بر حسب i را به دست آورده و نشان دهید رفتار مدار مشابه رفتار دیود در ناحیه مستقیم است. مقادیر V_γ و R_f را بر حسب V_{BE} و β و R_1 و R_2 به‌دست آورید.



☑ **راه حل:**

$$V_B=V_{th}=\frac{V\times R_2}{R_1+R_2}$$

$$R_{th}=R_1\parallel R_2$$

$$I_B=\frac{V_B-V_{BE}}{R_{th}}\quad,\quad I_C=\beta I_B=\beta\times\frac{V_B-V_{BE}}{R_{th}}$$

$$i=I_C+I_{R_2}+I_B\qquad I_{R_2}=\frac{V_{BE}}{R_2}$$

$$\to i=(1+\beta)I_B+I_{R_2}$$

$$\to i=(1+\beta)\times\frac{V_B-V_{BE}}{R_{th}}+\frac{V_{BE}}{R_2}=(1+\beta)\times\frac{\frac{VR_2}{R_1+R_2}-V_{BE}}{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}+\frac{V_{BE}}{R_2}$$

$$=(1+\beta)\times V\times\frac{R_2}{R_1+R_2}\times\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}-(1+\beta)\times\frac{V_{BE}}{R_1R_2}(R_1+R_2)+\frac{V_{BE}}{R_2}$$

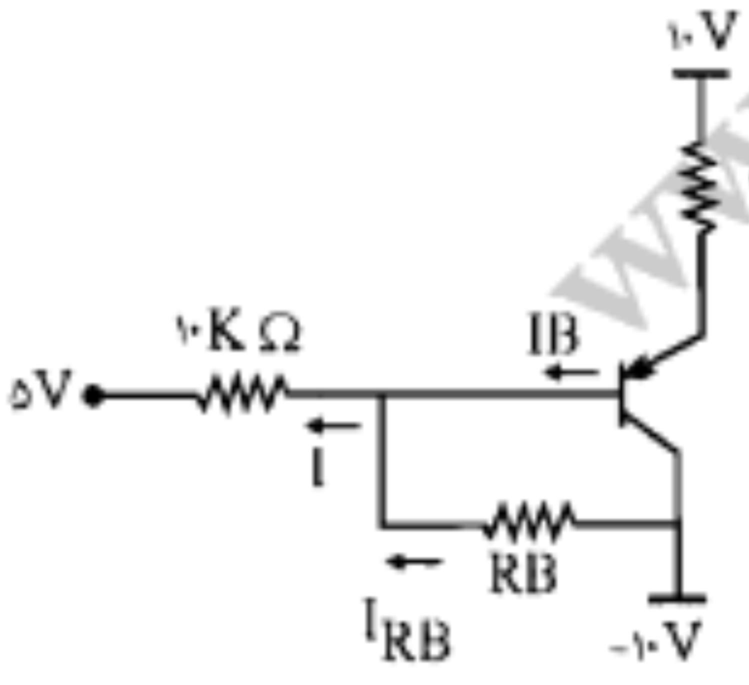
$$=\frac{(1+\beta)V}{R_1}-V_{BE}\times\left[\frac{1+\beta}{R_1\parallel R_2}-\frac{1}{R_2}\right]$$

و رفتار دیود در ناحیه مستقیم به شکل زیر می‌باشد:

$$i=(V-V_\gamma)\times\frac{1}{R_f}$$

$$R_f=\frac{R_1}{R_1+R_2}\qquad V=\frac{R_1}{1+\beta}\left[\frac{1+\beta}{R_1\parallel R_2}-\frac{1}{R_2}\right]V_{BE}$$

۲۷ـ در مدار شکل م ـ ۲۷ برای ترانزیستور $V_{EC}(sat)=0/2V$ و $V_{EB}(sat)=0/8V$ و $V_{BE}(ON)=0/7V$ و $\beta=100$ است.



شکل م_۲۷

الف) به ازای $R_B=5K\Omega$ ولتاژ و جریان امیتر را به دست آورید.

ب) آیا می‌توان R_B را طوری تعیین نمود که ترانزیستور اشباع شود.

ج) آیا می‌توان R_B را طوری تعیین نمود که ترانزیستور قطع شود.

☑ **راه حل:**

الف)

$$KVL: 1K\Omega\times I_E+10I=10-5-0/7\Rightarrow I_E+10I=4/3\ (I)$$

$$KVL: 10I+R_B\times I_{RB}=-10-5\Rightarrow 10I+5\times(I-I_B)=-15\Rightarrow$$

$$10I+5\left(I-\frac{I_E}{100+1}\right)=-15\Rightarrow\frac{-5}{101}I_E+15I=-15\ (II)$$

www.PnuEB.com

$$(I),(II) \Rightarrow \begin{cases} I_E + ۱۰I = ۴/۳ \rightarrow I = \dfrac{۴/۳ - I_E}{۱۰} & (III) \\ \dfrac{-۵}{۱۰۱} I_E + ۱۵I = -۱۵ \Rightarrow & \end{cases}$$

(III) را در (II) قرار می‌دهیم

$$\Rightarrow \frac{-۵}{۱۰۱} I_E + ۱۵ \times \frac{۴/۳ - I_E}{۱۰} = -۱۵ \Rightarrow I_E = ۱۳/۸۴\ mA$$

$$\Rightarrow V_E = ۱۰ - ۱K\Omega \times I_E = ۱۰ - ۱۳/۸۴ = -۳/۸۴\ V$$

ب) برای اینکه ترانزیستور ناحیه اشباع قرار گیرد باید $V_{CE} = -۰/۲V$ باشد و $V_{EB}(sat) = ۰/۸$

$$KVL: ۱ \times I_E = ۱۰ - (-۱۰) - ۰/۲ \Rightarrow I_E = ۱۹/۸\ mA$$

$$I_B(sat) = \frac{I_E}{۱+\beta} = \frac{۱۹/۸}{۱۰۱} = ۰/۱۹۶\ mA$$

$$KVL: ۱۰I + ۱ \times I_E = ۱۰ - ۵ - ۰/۸ \Rightarrow I = -۱/۵۶\ mA$$

$$I_{RB} = \frac{V_{EB} - V_{EC}}{R_B} = \frac{۰/۸ - ۰/۲}{R_B} = \frac{۰/۶}{R_B}$$

از طرفی: $I_{RB} = I - I_B \Rightarrow \dfrac{۰/۶}{R_B} = -۱/۵۶ - I_B$

$$\rightarrow I_B = -۱/۵۶ - \frac{۰/۶}{R_B}$$

ملاحظه می‌کنیم که I_B مقدار منفی دارد و نمی‌تواند از $I_B(sat)$ بیشتر باشد پس ترانزیستور هیچ وقت به اشباع نمی‌رود.

ج) برای اینک ترانزیستور قطع شود:

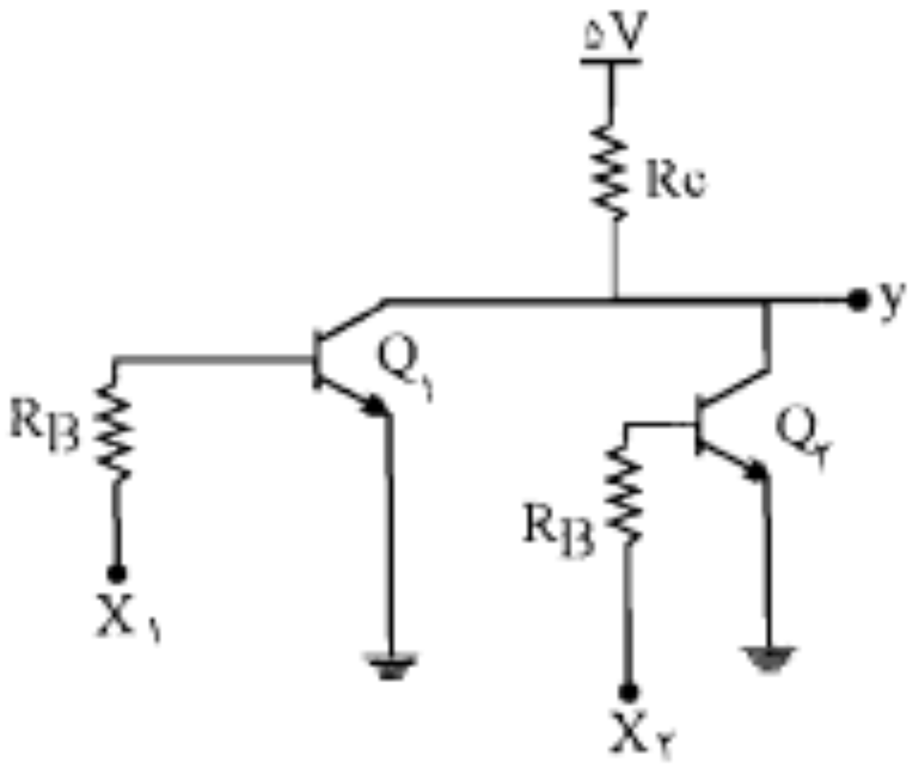
$$\begin{cases} I_E = ۰ \\ V_{EB} = ۰ \end{cases} \Rightarrow KVL: ۱۰I = ۱۰ - ۵ \rightarrow I = ۰/۵\ mA \quad , \quad I_{RB} = \frac{-۱۰-۱۰}{R_B} = \frac{-۲۰}{R_B}$$

$$I_B = I - I_{RB} = ۰/۵ + \frac{۲۰}{R_B}$$

برای اینکه ترانزیستور قطع شود باید $I_{B_۱} < -I_{C_۰}$ شود می‌بینیم که I_B مقداری مثبت است و نمی‌تواند از $-I_{CO}$ کوچکتر شود پس ترانزیستور هیچ وقت به حالت قطع نمی‌رود.

۲۸ـ در مدار شکل م ـ ۲۸ با فرض اینکه $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ و با صرفنظر از جریان I_{CB}. جدول داده شده را تکمیل نمایید.

$x_۱$	$x_۲$	y
۰ V	۰ V	
۰ V	۵ V	
۵ V	۵ V	



شکل م ـ ۲۸

راه حل:

$x_۱ = ۰V$ پس در ترانزیستور $Q_۱$ $I_B = ۰$ و $x_۲ = ۰V$ در ترانزیستور $Q_۲$ نیز $I_B = ۰$ می‌باشد پس $V_۰ = V_{CC}$ یعنی $y = V_۰ = ۵V$

$x_۱$	$x_۲$	y
۰ V	۰ V	۵ V
۰ V	۵ V	۰/۲ V
۵ V	۵ V	۰/۲ V

در حالت دوم $x_۱ = ۰V$ و $x_۲ = ۵V$ در ترانزیستور اول I_B صفر می‌شود ولی در ترانزیستور دوم جریان I_B داریم.

$$R_B I_{B_۲} = ۵ - V_{BE} \Rightarrow I_{B_۲} = \frac{۴/۳}{R_B}$$

اگر ترانزیستور $Q_۲$ در حالت اشباع باشد $y = ۰/۲V$ می‌شود پس باید تحقیق کنید که $Q_۲$ در حالت اشباع قرار دارد یا نه.

$$R_C(I_{C_۱} + I_{C_۲}) = ۵ - V_{CE_۲} \Rightarrow R_C I_{C_۲} = ۴/۸ \Rightarrow I_{C_۲} = \frac{۴/۸}{R_C}$$

باید داشته باشیم $I_{B_۲} > I_B(sat) = \dfrac{I_{C_۲}}{\beta_{min}} \Leftarrow$

$$\frac{۴/۳}{R_B} \geq \frac{۴/۸}{R_C \times \beta_{min}}$$

و بین مقاومت‌های R_C و R_B باید رابطه فوق برقرار باشد تا ترانزیستور $Q_۲$ در اشباع باشد.

$$\frac{R_B}{R_C} \leq \frac{۴/۳ \times \beta_{min}}{۴/۸} \Rightarrow \frac{R_B}{R_C} \leq ۰/۸۹۶\beta_{min}$$

www.*PnuEB*.com
www.*PnuEB*.com

پس با $x_{۱} = ۰$ و $x_{۲} = ۵$ با شرایط فوق $y = ۰/۲$ ولت می‌شود.

و اگر $x_{۲} = x_{۱} = ۵$ ولت باشند.

$$I_{B_{۱}} = I_{B_{۲}} = \frac{۴/۳}{R_B}$$

با اشباع بودن $Q_۱$ و $Q_۲$ خواهیم داشت $(I_{C_{۱}} = I_{C_{۲}})$

$$V_{CE_{۲}} = V_{CE_{۱}} = ۵ - R_C(I_{C_{۱}} + I_{C_{۲}}) = ۵ - I_{C_{۲}} \times R_C = ۰/۲V$$

$$\Rightarrow I_{C_{۲}} = \frac{۴/۸}{۲R_C}$$

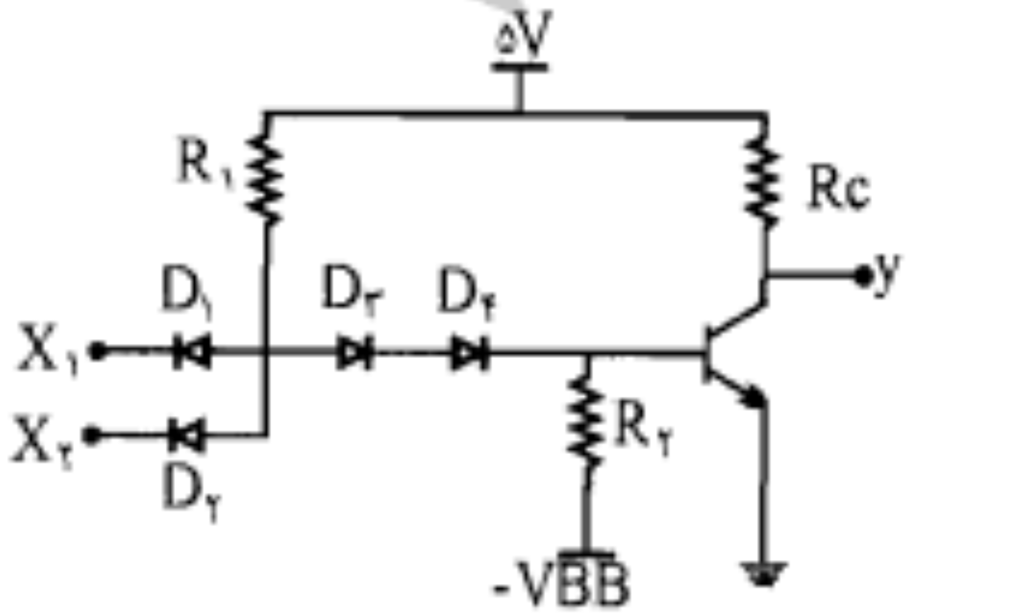
شرط در اشباع بودن $I_{B_{۲}} \ge \frac{I_{C_{۲}}}{\beta_{min}} \Rightarrow \frac{۴/۳}{R_B} \ge \frac{۴/۸}{۲R_C\beta_{min}}$

$$\frac{R_B}{R_C} \le \frac{۴/۳ \times ۲ \times \beta_{min}}{۴/۸} \Rightarrow \frac{R_B}{R_C} \le ۲ \times ۰/۸۹۶\beta_{min}$$

لذا با شرط فوق هر دو ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارند و $y = ۰/۲$ ولت می‌باشد.

۲۹ ـ مدار شکل م ـ ۲۹ یک NAND از خانواده DTL است. با فرض اینکه ولتاژ هدایت هر دیـود ۰/۷۷ بوده و برای ترانزیستور، ولتاژهای آستانه هدایت، ناحیه فعال و اشباع بیس ـ امیتر به ترتیب برابر ۰/۵V و ۰/۷۷V و ۰/۸V در نظر گرفته شوند، در مورد نحوه عملکرد مدار و مقدار خروجی y به ازای مقادیر جدول داده شده بحث کنید. $(V_{CE}(sat) = ۰/۲V)$

$x_۱$	$x_۲$	y
۰ V	۰ V	
۰ V	۵ V	
۵ V	۵ V	



$x_۱$	$x_۲$	y
۰ V	۰ V	۵ V
۰ V	۵ V	۵ V
۵ V	۵ V	۰/۲ V

☑ **راه حل:**

در حالت اول وقتی هر دو ورودی صفر باشند ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد و در این حالت ولتاژ خروجی یعنی y با V_{CC} برابر می‌شود یعنی $y = V_{CC} = ۵V$

در حالت دوم وقتی که یکی صفر و دیگری ۵V می‌باشد باز هر دو ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد و ولتاژ خروجی برابر است با $V_{CC} = ۵V$

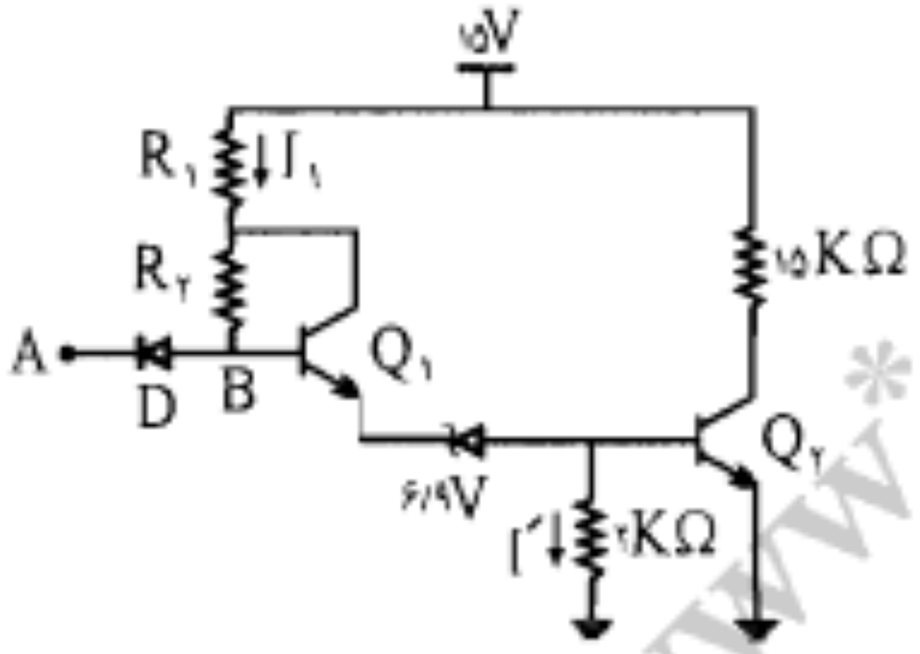
در حالت سوم وقتی هر دو ورودی ۵ ولت باشند ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد و ولتاژ خروجی با V_{CE} برابر است یعنی: $y = V_{CE}(sat) = ۰/۲V$

۳۰ ـ مدار شکل م ـ ۳۰ بخشی از یک دروازه منطقی است که به صورت یک معکوس کننده عـمل می‌کند. با فرض ایده‌آل بودن دیود D، $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ و $V_{BE}(sat) = ۰/۸V$.

الف) وضعیت ترانزیستورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ و دیود D را در $Y = ۰$ و $Y = ۱$ تعیین نمایید. (منظور ۰ و ۱ منطقی است).

ب) فرض کنید در ورودی و خروجی، این مدار به دروازه مشابه خود وصل شده باشد. ولتاژ نقاط A، B را برای $Y = ۰$ و $Y = ۱$ تعیین نمایید.

ج) در صورتی که $\beta_۱ = \beta_۲ = ۲۰$ باشد، $R_۱$ و $R_۲$ را طوری تعیین کنید که در حالت $Y = ۰$ جریان $I_۱$ برابر $I_{C_۲}(sat) / ۲$ شود.



شکل م ـ ۳۰

☑ **راه حل:**

الف) با فرض $Y = ۰$، ترانزیستور $Q_۲$ به اشباع می‌رود و دیود زنر در حالت شکست قرار می‌گیرد پس ولتاژ بیس ترانزیستور $Q_۱$ به صورت زیر می‌شود:

$$KVL: V_{B_{۱}} = V_{B_{E_{۱}}} + V_Z + V_{B_{E_{۲}}} = ۰/۷ + ۶/۹ + ۰/۷ = ۸/۳V$$

و وقتی $V_{B_{۱}} = ۸/۳V$ شود در این صورت V_A برابر ۱۵V خواهد بود یعنی ورودی در سطح (۱) می‌باشد در این صورت دیود D خاموش می‌باشد و ترانزیستور $Q_۱$ روشن می‌باشد.

و اگر $V_A = ۰/۲V$ باشد که برابر سطح منطقی صفر است در این صورت V_B برابر است با:

$$V_B = ۰/۲ + ۰/۷ = ۰/۹$$

یعنی $V_B = ۰/۹V$ می‌شود پس $Q_۱$ و $Q_۲$ هر دو قطع می‌باشد و $Y = ۱$ می‌شود پس

$V_Y = ۱۵V$ در سطح منطقی یک باشد پس در حالت ۱ = Y هر دو ترانزیستور خاموش و دیود D روشن می‌باشد و دیود زنر در بایاس معکوس می‌باشد و قطع می‌شود.

ب) V_A و V_B در بند الف محاسبه شده است.

ج) در حالتی که ۰ = Y می‌باشد، $Q_۲$ به اشباع می‌رود و دیود زنر در حالت شکست می‌باشد و داریم:

$$I_{C_۲}(sat) = \frac{۱۵ - V_y}{۱۵} = \frac{۱۵ - ۰/۲}{۱۵} = \frac{۱۴/۸}{۱۵} = ۰/۹۹\ mA$$

با توجه به جریان $I_۱$ داریم:

$$I_۱ = \frac{I_{C_۲}(sat)}{۲} = \frac{۰/۹۹}{۲} = ۰/۴۹۵\ mA$$

$$I_{E_۱} = I' + I_{B_۲} \qquad I_{E_۱} = \frac{V_{BE_۲}}{۲} + \frac{I_{C_۲}}{\beta} = \frac{۰/۸}{۲} + \frac{۰/۹۹}{۲۰}$$

$$I_{E_۱} = ۰/۴ + ۰/۰۴۹ = ۰/۴۴۹\ mA$$

$$I_{C_۱} = \frac{\beta}{۱+\beta} I_{E_۱} = \frac{۲۰}{۱+۲۰} \times ۰/۴۴۹ = ۰/۴۳\ mA$$

$$V_B = V_{BE_۱} + V_Z + V_{BE_۲} = ۰/۷ + ۶/۹ + ۰/۸ = ۸/۴$$

$$V_B = ۱۵ - R_۱ I_۱ - R_۲(I_۱ - I_{C_۱}) = ۸/۴$$

$$۱۵ - R_۱ \times ۰/۴۹۵ - R_۲(۰/۴۹۵ - ۰/۴۳) = ۸/۴$$

$$۰/۰۶۵ R_۲ = ۶/۶ - ۰/۴۹۵ R_۱ \quad (I)$$

طرف دوم رابطه (I) باید عدد مثبتی باشد پس:

$$۶/۶ - ۰/۴۹۵ R_۱ > ۰ \rightarrow R_۱ < ۱۳/۴۶\ K\Omega$$

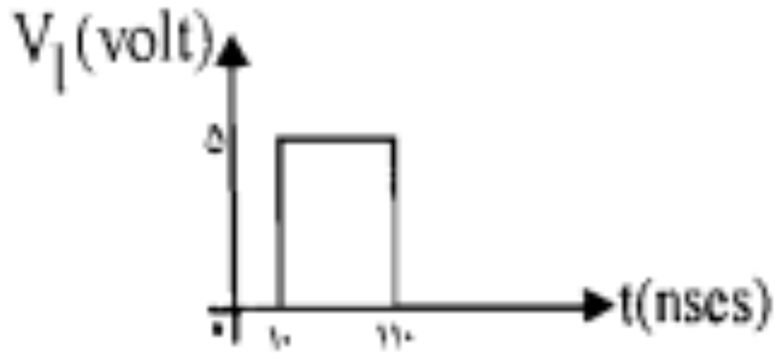
فرض: $R_۱ = ۱۲/۲۵ = R_۲ = \frac{۶/۶ - ۰/۴۹۵ \times ۱۲/۲۵}{۰/۰۶۵} = ۸/۵\ K\Omega$

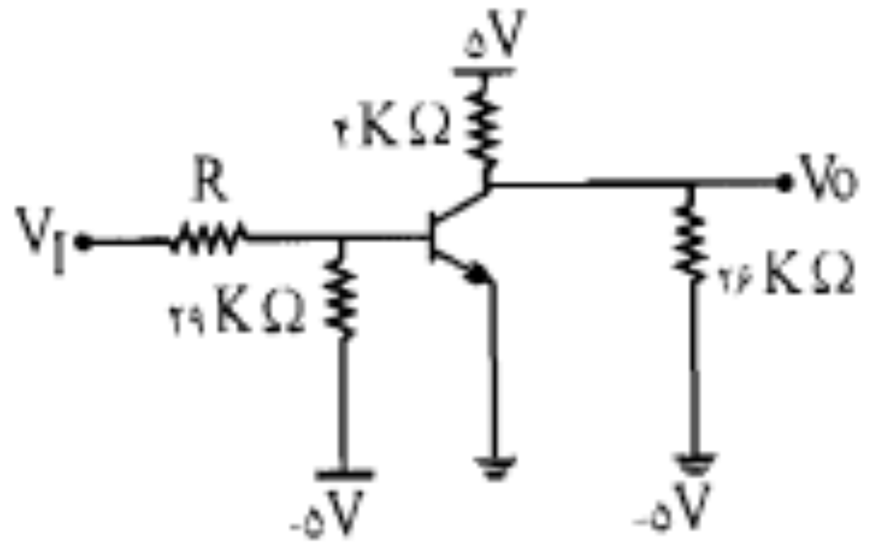
۳۱ـ در مدار شکل م ـ ۳۱، با فرض ۱۰۰ = β و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$

الف) حداکثر مقدار R را طوری تعیین کنید که با شکل موج ورودی نشان داده شده تغییر وضعیت ترانزیستور بین حالت‌های قطع و اشباع امکان‌پذیر باشد.

ب) ولتاژ خروجی بین چه مقادیری تغییر می‌کند؟

ج) در صورتی که ترانزیستور مورد نظر $t_s = ۶۰\ nsec$ و $t_f = ۱۰\ nsec$ و $t_r = ۲۰\ nsec$ و $t_d = ۲۰\ nsec$ باشد، شکل موج V_o را با مقیاس مناسب رسم کنید.





شکل م ـ ۳۱

☑ راه حل:

الف)

$$V_B = \frac{-۵ \times R}{R + ۲۰K\Omega} + \frac{۲۹ V_I}{R + ۲۹}$$

$$R_B = ۲۹ \parallel R = \frac{۲۹R}{۲۹ + R}$$

$$V_C = \frac{-۵ \times ۴}{۴ + ۲۶} + \frac{۵ \times ۲۶}{۲۶ + ۴} = -\frac{۲}{۳} + \frac{۱۳۰}{۳۰} = ۳/۷V$$

$$R_C = ۴K\Omega \parallel ۲۶K\Omega = \frac{۴ \times ۲۶}{۲۶ + ۴} = ۳/۵K\Omega$$

$$V_I = ۰ \rightarrow V_B = \frac{-۵R}{R + ۲۹}$$

به ازای تمام مقادیر **R** مقادیر V_B منفی است و ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد.

در حالت اشباع داریم:

$$V_I = ۵V$$

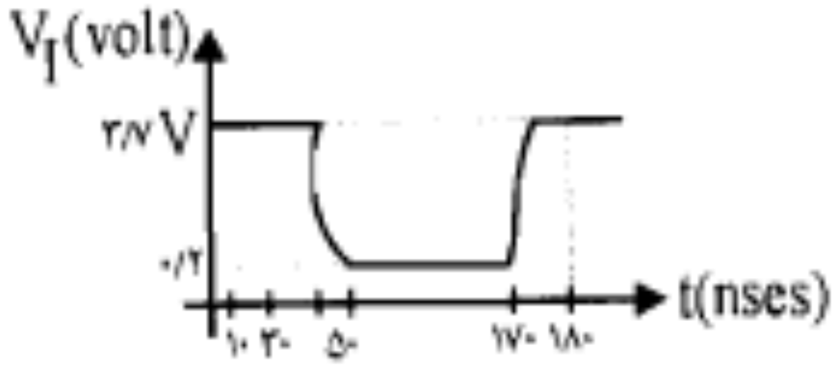
$$V_B = \frac{-۵R + ۲۹V_I}{R + ۲۹} = ۰/۸$$

$$\frac{-۵R + ۲۹ \times ۵}{R + ۲۹} = ۰/۸ \rightarrow -۵R + ۱۴۵ = ۰/۸R + ۲۳/۲$$

$$۵/۸R = ۱۲۱/۸ \rightarrow R_{max} = ۲۱K\Omega$$

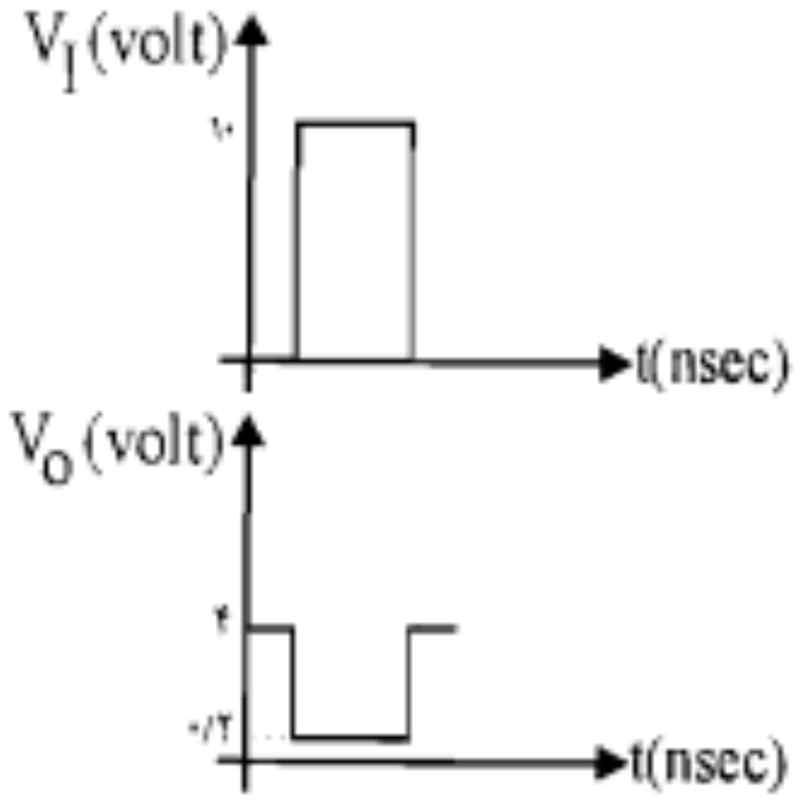
ب) بین $V_C = ۳/۷V$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$

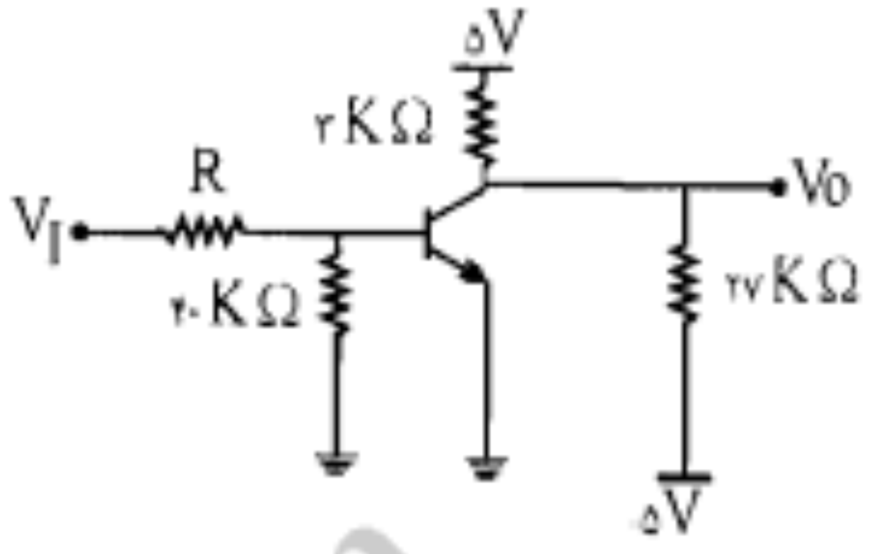
ج) وقتی $V_I = ۵V$ است، ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد و $V_o = ۰/۲V$ می‌باشد، و وقتی $V_I = ۰V$ است، ترانزیستور در حالت قطع قرار دار و $V_o = ۳.۷V$ می‌باشد.



www.*PnuEB*.com

۳۲ـ در مدار شکل م ـ ۳۲، با فرض ۱۰۰ = β و $V_{CE}(sat) = 0.2V$ ، به ازای شکل موج ورودی V_I ، شکل موج خروجی V_o حاصل شده است. (از زمان‌های قطع و وصل ترانزیستور صرف‌نظر شده است) مقدار مقاومت R چقدر باید باشد؟ این مقدار حداقل است یا حداکثر؟





شکل م ـ ۳۲

☑ راه حل:

مدار معادل تونن را در کلکتور در نظر می‌گیریم:

$$V_C = 5\times\frac{27}{27+3} + \frac{(-5)\times 3}{27+3} = 4V$$

$$R_C = 3K\Omega \parallel 27K\Omega = \frac{3\times 27}{3+27} = 2.7K\Omega$$

همچنین مدار معادل تونن در بیس به صورت زیر است:

$$V_B = \frac{V_I\times 40}{40+R}$$

$$R_B = R \parallel 40 = \frac{40R}{R+40}$$

وقتی $V_I = 0V \to$ ترانزیستور در حالت قطع است $\to V_o = V_C = 4V$

$V_I = 10V$ ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد.

وقتی $V_I = 10V \to V_B = \frac{10\times 40}{40+R} = 0.8$

$$\frac{400}{40+R} = 0.8 \to 400 = 32 + 0.8R \to R = 460K\Omega$$

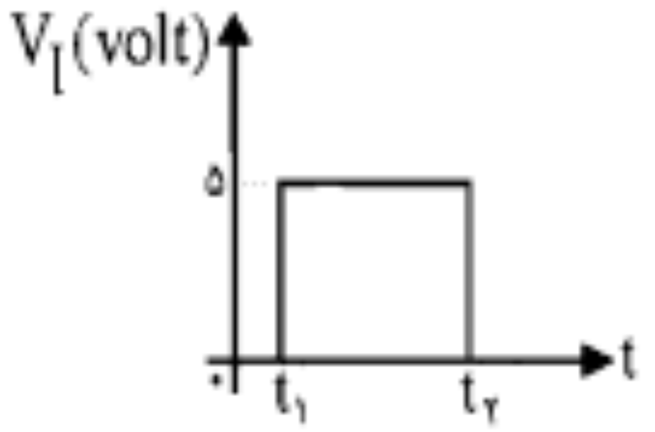
این مقدار برای R حداکثر می‌باشد چون اگر مقدار R از این مقدار بیشتر باشد مقدار V_B از ۰/۸ کوچکتر می‌شود و ترانزیستور به حالت قطع پیش می‌رود.

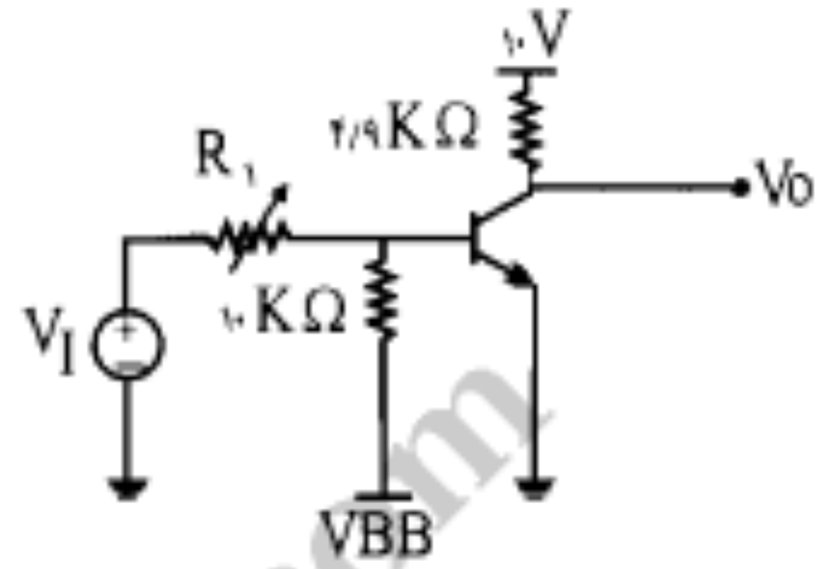
۳۳ـ در مدار کلید ترانزیستوری شکل م ـ ۳۳، $I_{CBO} = 0.01\mu A$ (در دمای ۲۵°C) و $20 \le \beta \le 50$ و $0 \le R_1 \le 10K\Omega$ و $V_{CE}(sat) = 0.2V$ و $V_{BE}(sat) = 0.8V$ و $V_{BE}(cut) = 0$ است.

الف) در صورتی که بخواهیم به ازای $V_I = 0$ ترانزیستور تا دمای ۱۷۵°C در حالت قطع باشد، حداکثر مقدار ولتاژ منبع V_{BB} چقدر باید باشد؟

ب) به ازای $R_1 = 6K\Omega$ و $V_{BB} = -5V$ ، در دمای ۲۵°C شکل موج ولتاژ خروجی را برای شکل موج ورودی V_I نشان داده شده به دست آورید.

ج) وجود مقاومت متغیر R_1 چه اشکال عملی می‌تواند داشته باشد؟





شکل م ـ ۳۳

☑ راه حل:

الف) مدار معادل تونن ورودی را می‌نویسیم:

$$V_B = V_I\times\frac{10}{R_1+10} + \frac{V_{BB}\times R_1}{R_1+10}$$

$$R_B = R_1 \parallel 10K\Omega$$

$$I_{CBO}(175) = I_{CBO}(25)\times 2^{\frac{175-25}{10}} = 0.01\mu A\times 2^{15} = 327.68\mu A$$

در حالت قطع باید داشته باشیم $I_B \le -I_{CBO}$

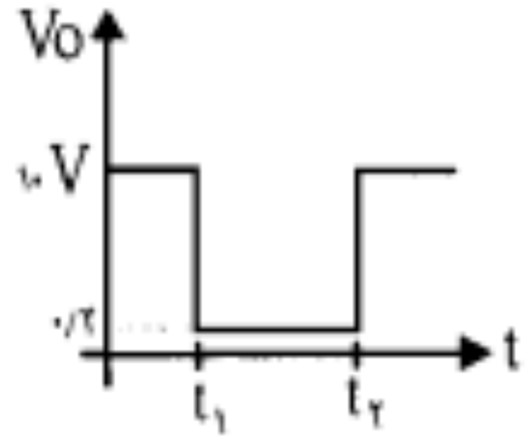
$$I_B = \frac{V_{BB}}{10} \Rightarrow \frac{V_{BB}}{10} \le -327.68\times 10^{-3} \Rightarrow V_{BB} \le 3.28V$$

ب)

$$V_B = \frac{10V_I}{10+R_1} + \frac{V_{BB}R_1}{10+R_1} \quad \begin{cases} V_{BB} = -5V \\ R_1 = 6K\Omega \end{cases}$$

$$V_B = \frac{10V_I}{16} - \frac{30}{16} \quad , \quad R_B = \frac{10\times 6}{10+6} = \frac{60}{16} = 3.75$$

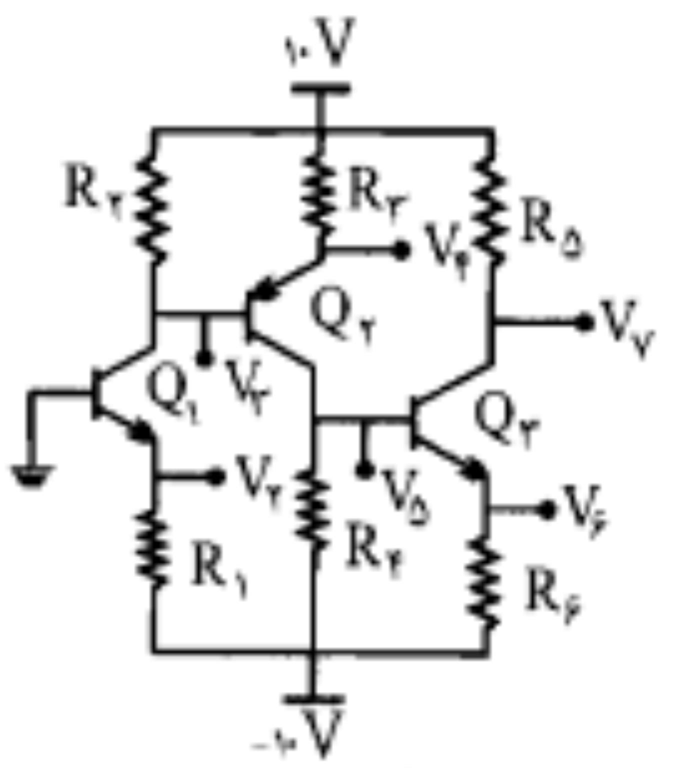
$\to \begin{cases} V_I = 0 \to V_B = \frac{-30}{16} \to \text{ترانزیستور قطع} \to V_o = V_{CC} = 10V \\ V_I = 5 \to V_B = \frac{20}{16} \to \text{ترانزیستور اشباع} \to V_o = 0.2V \end{cases}$



ج) اگر R_1 پتانسیومتر باشد R_1 صفر باشد در این صورت $V_I = 5V$ ، همه ولتاژ ورودی روی پیوند بیس، امیتر می‌افتد که این کار موجب آسیب دیدن ترانزیستور می‌شود.

www.PnuEB.com

۳۴ـ در مدار شکل م ـ ۳۴ با فرض $\beta = \infty$، مقادیر مقاومت‌ها را طوری تعیین کنید که جریان کلکتورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ و $Q_۳$ به ترتیب ۲، ۲ و ۴ میلی‌آمپر؛ $V_۳ = ۰$ ، $V_۵ = -۴$ ، $V_۷ = ۲$ ولت باشد. با مقادیر به دست آمده فوق به ازای $\beta = ۱۰۰$ مقادیر $V_۲$ و $V_۳$ و $V_۴$ و $V_۵$ و $V_۶$ و $V_۷$ را به دست آورید.



شکل م ـ ۳۴

☑ **راه حل:**

$$\beta = \infty \rightarrow I_B = ۰$$

$$\begin{cases} I_{Q_۱} = ۲ = \dfrac{۱۰ - V_۳}{R_۲} = \dfrac{۱۰ - ۰}{R_۲} \rightarrow R_۲ = ۵K\Omega \\ I_{Q_۲} = ۲ = \dfrac{۱۰ - v_۴}{R_۳} = \dfrac{۱۰ - (V_۳ + ۰/۷)}{R_۳} = \dfrac{۱۰ - ۰/۷}{R_۳} \rightarrow R_۳ = ۴/۶۵\ K\Omega \\ I_{Q_۳} = ۴ = \dfrac{۱۰ - V_۷}{R_۵} = \dfrac{۱۰ - (۲)}{R_۵} \rightarrow R_۵ = ۲K\Omega \end{cases}$$

$$KVL: V_۲ - (-۱۰) = R_۱ \times I_{Q_۱} = ۲R_۱ \rightarrow (۰ - ۰/۷) + ۱۰ = ۲R_۱ \rightarrow R_۱ = ۴/۶۵K\Omega$$

$$KVL: V_۵ - (-۱۰) = R_۴ \times I_{Q_۲} = ۲R_۴ \rightarrow ۱۰ - ۴ = ۲R_۴ \rightarrow R_۴ = ۳K\Omega$$

$$KVL: V_۶ - (-۱۰) = R_۶ \times IQ_۳ = ۴R_۶ \rightarrow (V_۵ - ۰/۷) + ۱۰ = ۴R_۶$$

$$\rightarrow ۱۰ - ۴/۷ = ۴R_۶ \rightarrow R_۶ = ۱/۳۲۵K\Omega$$

$\beta = ۱۰۰$:

$$V_۲ = ۰ - ۰/۷ = -۰/۷V$$

$$I_{E_۱} = \frac{۱۰ - ۰/۷}{۴/۵} = ۲mA \rightarrow I_{C_۱} = ۱/۹۸mA \rightarrow I_{C_۱} = \frac{۱۰ - V_۳}{R_۲} = \frac{۱۰ - V_۳}{۵} = ۱/۹۸mA$$

$$۱۰ - V_۳ = ۹/۹ \rightarrow V_۳ = ۰/۱V \rightarrow V_۴ = V_۳ + ۰/۷ = ۰/۱ + ۰/۷ = ۰/۸V$$

$$V_۵ = -۱۰ + R_۴ I_{C_۲} \Rightarrow I_{C_۲} = \frac{\beta}{۱+\beta} I_{E_۲}$$

$$I_{C_۲} = \frac{\beta}{۱+\beta} I_{E_۲} \rightarrow I_{E_۲} = \frac{۱۰ - V_۴}{R_۳} = \frac{۱۰ - ۰/۸}{۴/۵۶} = ۱/۹۸mA$$

$$I_{C_۲} = \frac{۱۰۰}{۱۰۱} \times ۱/۹۸ = ۱/۹۶\ mA \rightarrow V_۵ = -۱۰ + ۳ \times ۱/۹۶ = -۴/۱۲V$$

$$V_۶ = V_۵ - ۰/۷ = -۴/۱۲ - ۰/۷ = -۴/۸۲$$

$$V_۷ = ۱۰ - R_۵ I_{C_۳}$$

$$I_{C_۳} = \frac{\beta}{\beta + ۱} I_{E_۳} \rightarrow I_{E_۳} = \frac{V_۶ - (-۱۰)}{R_۶} = \frac{-۴/۸۲ + ۱۰}{۱/۳۲۵} = ۳/۹\ mA$$

$$\rightarrow I_{C_۳} = \frac{۱۰۰}{۱۰۱} \times ۳/۹\ mA = ۳/۸۶\ mA$$

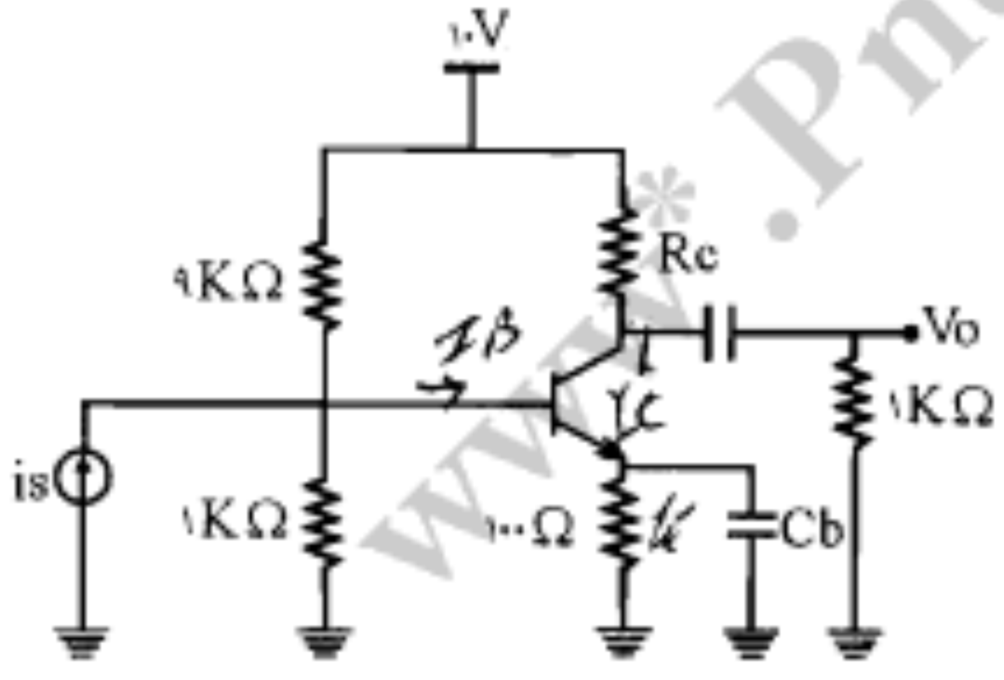
$$\rightarrow V_۷ = ۱۰ - ۲ \times ۳/۸۶\ mA = ۲/۲۸V$$

www.*PnuEB.*com

www.pnueb.com

فصل ۵
طراحی مدارهای بایاس ترانزیستور

۱ـ در مدار شکل م ـ ۱، با فرض $\beta = ۱۰۰$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$، مقدار R_C را طوری تعیین نمایید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ V_O حداکثر شود.

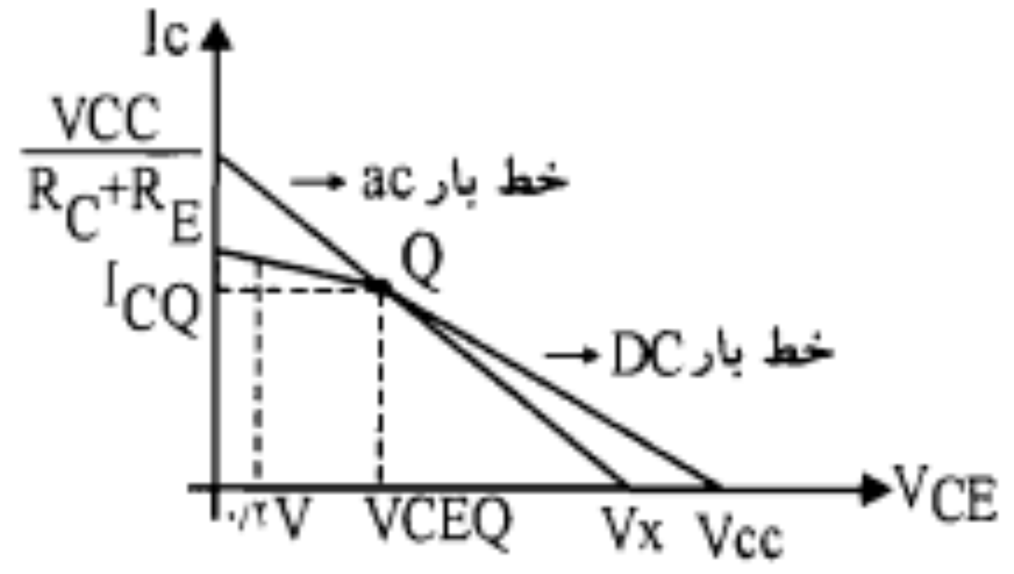


شکل م ـ ۱

☑ راه حل:

مدار معادل ورودی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} V_{th} = \frac{۱۰V \times ۱K\Omega}{۱K\Omega + ۹K\Omega} = ۱V \\ R_{th} = ۱K\Omega \parallel ۹K\Omega = \frac{۹}{۱۰} = ۰/۹K\Omega \end{cases}$$



$$I_{EQ} \simeq I_{CQ}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{th} - ۰/۷}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}}$$

$$\rightarrow I_{EQ} = \frac{۱ - ۰/۷}{۰/۱ + \frac{۰/۹}{۱۰۰}} = \frac{۰/۳}{۰/۱ + ۹ \times ۱۰^{-۳}} = ۲/۷۵\ mA$$

$$\rightarrow I_{CQ} = ۲/۷۵\,mA$$

برای اینکه دامنه نوسان متقارن حداکثر شود باید:

$$V_{CEQ} = \frac{V_x - ۰/۲}{۲} \quad (I)$$

$$KVL: V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = ۱۰ - (۰/۱ + R_C) \times ۲/۷۵ \quad (II)$$

معادله خط بار ac: $V_{CE} = V_{CEQ} = -R_{ac}(I_C - I_{CQ})$

در محل تقاطع با محور ولتاژ V_x → $I_C = ۰ \rightarrow V_x = R_{ac} I_{CQ} + V_{CEQ}$ (III)

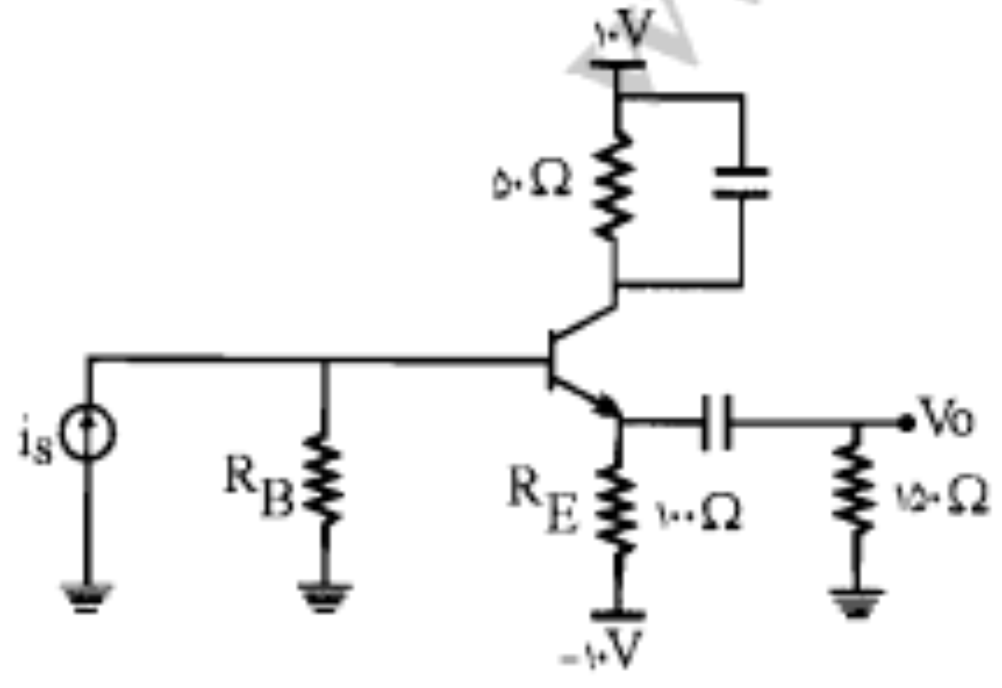
$$R_{ac} = ۱K\Omega \parallel R_C = \frac{R_C}{۱ + R_C}$$

(II) و (III) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$۱۰ - ۲/۷۵(۰/۱ + R_C) = \frac{(\frac{R_C}{۱ + R_C}) \times ۲/۷۵ + ۱۰ - (۰/۱ + R_C) \times ۲/۷۵ - ۰/۲}{۲}$$

این معادله یک معادله درجه (۲) می‌باشد که با حل آن مقدار $R_C = ۲/۸۳K\Omega$ به دست می‌آید.

۲ـ در مدار شکل م ـ ۲، با فرض $R_B \ll \beta R_E$، نقطه کار را به دست آورده، خط بارها را رسم نمایید. حداکثر دامنه نوسان متقارن V_o را مشخص کنید.



شکل م ـ ۲

☑ راه حل:

$$KVL: V_{CEQ} = V_{CC} - V_{EE} - (R_C + R_E) I_{CQ} \quad (I)$$

$I_{CQ} = ? \rightarrow$ KVL در حلقه R_B و V_{BE} و R_E و V_{EE}:

$$\rightarrow \frac{R_B}{\beta} I_{CQ} + ۰/۷ + R_E I_E - ۱۰ = ۰ \Rightarrow I_{CQ} = \frac{۹/۳}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

طبق فرض مسئله $R_B \ll \beta R_G$ یعنی $\frac{R_B}{\beta} \ll R_E$ ← از $\frac{R_B}{\beta}$ در برابر R_E صرفنظر می‌کنیم.

$$I_{CQ}=\frac{9.3}{R_E}=\frac{9.3}{0.1}=93\,mA$$

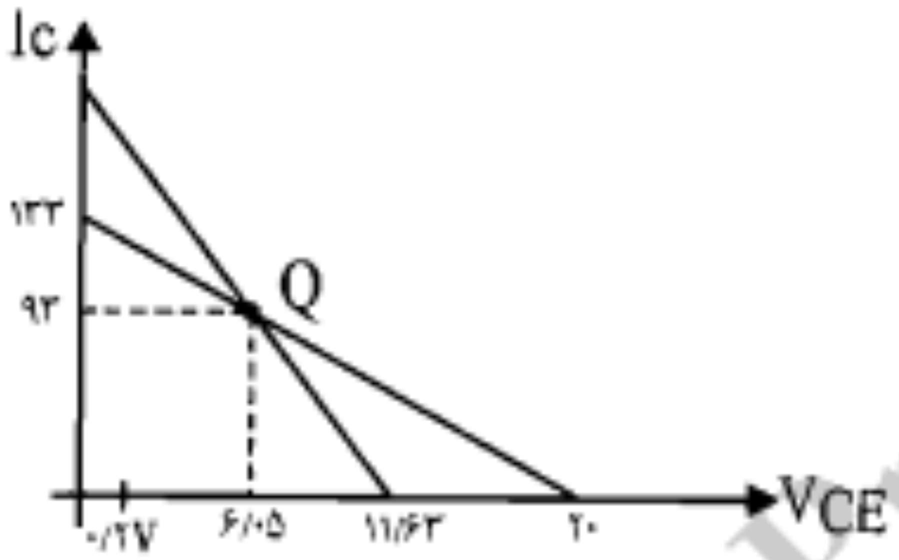
$$(I)\to V_{CEQ}=10-(-10)-(0.05+0.1)\times 93=20-0.15\times 93=6.05\,V$$

خط بار CD: $20-0.15I_C=V_{CE}$

خط بار ac $V_{CE}-V_{CEQ}=-R_{ac}(I_C-I_{CQ})$, $R_{ac}=0.1K\Omega \,\|\, 0.15K\Omega=60\,\Omega$

محل تقاطع خط بار ac با ولتاژ $I_C=0\to V_{CE}-V_{CEQ}=60\Omega\, I_{CQ}\times 10^{-3}=0.06I_{CQ}\to$

$$\to V_{CE}=V_x=0.06I_{CQ}+V_{CEQ}=11.63$$



حداکثر دامنه نوسان متقارن V_O:

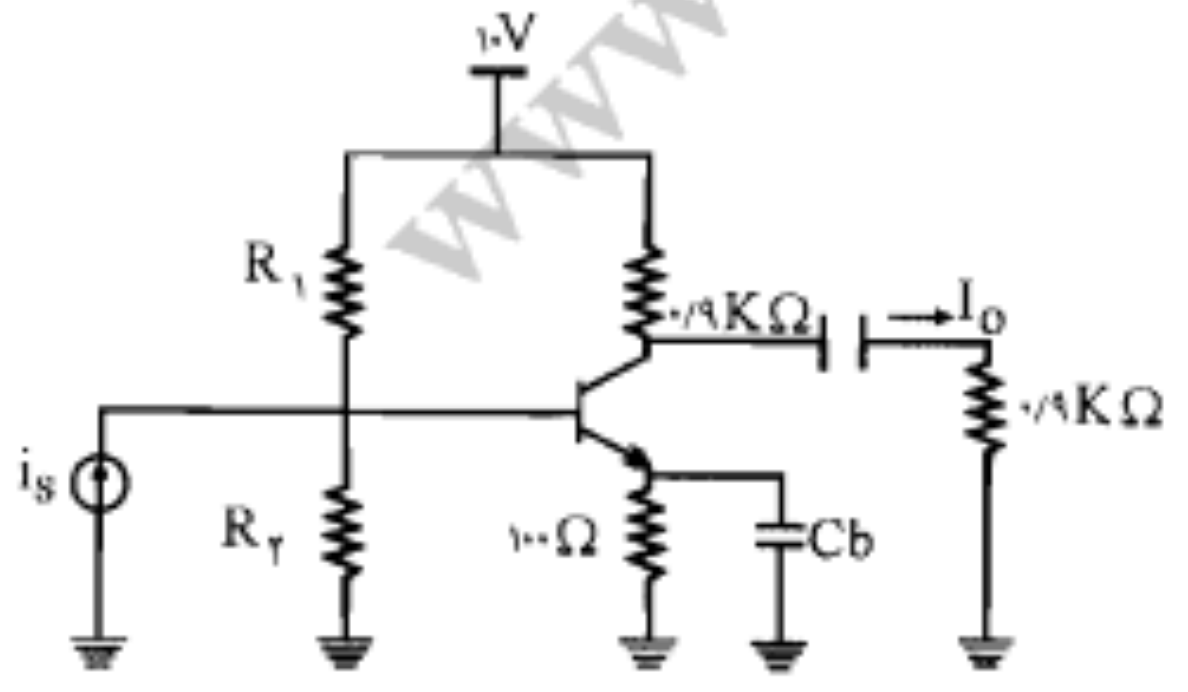
$$V_O^+=V_x-V_{CEQ}=11.63-7.05=5.58\,V$$

حداقل دامنه نوسان متقارن V_O:

$$V_O^-=V_{CEQ}-V_{CE}(sat)$$

$$\to V_O^-=6.05-0.2=5.85$$

۳- تقویت کننده شکل م ـ ۳ را با فرض $\alpha=0.99$ در نظر بگیرید.



شکل م ـ ۳

الف) R_1 و R_2 را طوری محاسبه کنید که دامنه نوسان متقارن جریان i_o حداکثر شود.

ب) خط بارهای ac و DC را رسم کنید؛ حداکثر دامنه جریان کلکتور چقدر است؟

ج) حداکثر دامنه جریان i_o چقدر می‌تواند باشد؟

☑ راه حل:

الف) شرط اینکه دامنه نوسان خروجی حداکثر شود این است که نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد.

$$R_{ac}=0.9K\Omega \,\|\, 0.9K\Omega=\frac{0.9\times 0.9}{0.9+0.9}=0.45\,K\Omega$$

$$R_{DC}=0.9K\Omega+0.1K\Omega=1K\Omega$$

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}}{R_{ac}+R_{DC}}=\frac{10\,V}{1+0.45}=6.9\,mA$$

مدار معادل تونن: $V_{th}=\frac{V_{CC}\times R_2}{R_1+R_2}=\frac{10R_2}{R_1+R_2}$ (I)

$$R_{th}=R_1\,\|\,R_2=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}\to\frac{R_2}{R_1+R_2}=\frac{R_{th}}{R_1}\quad (II)$$

از طرفی: $R_{th}=\frac{\beta R_E}{10}\Rightarrow\beta=\frac{\alpha}{1-\alpha}=\frac{0.99}{1-0.99}=99\to R_{th}=\frac{99\times 0.1}{10}=0.99\,K\Omega$

$$(II):\ \frac{R_2}{R_1+R_2}=\frac{R_{th}}{R_1}=\frac{0.99}{R_1}$$

$$(I):\ V_{th}=\frac{10\times 0.99}{R_1}=\frac{9.9}{R_1}$$

از طرفی: $I_{CQ}=\beta I_B\Rightarrow 6.9\,mA=99\times\frac{V_{th}-0.7}{R_{th}+\beta R_E}=99\times\frac{(\frac{9.9}{R_1}-0.7)}{0.99+99\times 0.1}$

$$\to 6.9\,mA=\frac{\frac{9.9}{R_1}-0.7}{0.01+0.1}=\frac{\frac{9.9}{R_1}-0.7}{0.11}\to 0.759=\frac{9.9}{R_1}-0.7$$

$$\to R_1=6.78\,K\Omega$$

$$\to\frac{R_2}{R_1+R_2}=\frac{0.99}{R_1}\to\frac{R_2}{6.78+R_2}=\frac{0.99}{6.78}=0.15$$

$$\to R_2=1.017+0.15R_2\to R_2=1.19\,K\Omega$$

ب)

خط بار DC: $V_{CE}=V_{CC}-I_C(R_C+R_E)$

خط بار ac: $V_{CE}-V_{CEQ}=-R_{ac}(I_C-I_{CQ})$

از طرفی: $V_{CEQ}=V_{CC}-(R_C+R_E)I_{CQ}=10-(0.1+0.9)\times 6.9=3.1\,V$

محل تقاطع خط بار ac با ولتاژ:

$$i_C=0\to V_{CE}=3.1+0.45\times 6.9\,mA=6.2\,V$$

محل تقاطع خط بار ac با جریان:

$$V_{CE}=0\to -V_{CEQ}=-R_{ac}(i_C-I_{CQ})\to$$

www.PnuEB.com

$-۳/۱ = -۰/۴۵(i_C - ۶/۹) \to i_C - ۶/۹ = ۶/۸۶ \to i_C = ۱۳/۷۷mA$

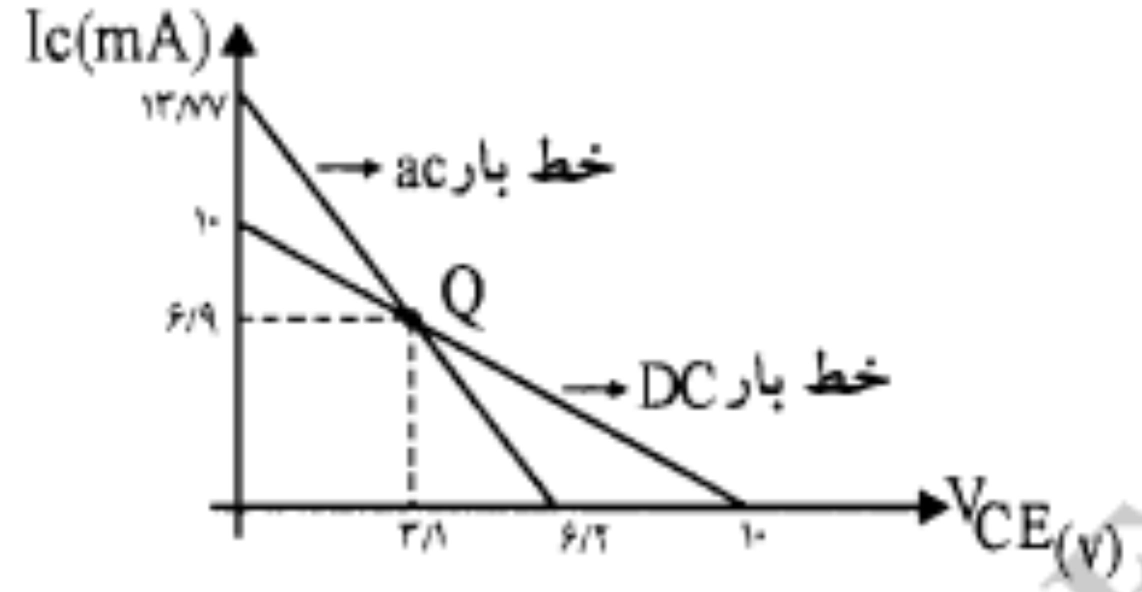
$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \to I_C = ۱۳/۷۷mA$

محل تقاطع خط بار DC با ولتاژ

$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \to I_C = ۰ \to V_{CE} = V_{CC} = ۱۰ V$

محل تقاطع خط بار DC با جریان

$V_{CE} = ۰ \to I_C = \frac{۱۰}{۰/۱ + ۰/۹} = ۱۰ mA$



حداکثر مقدار جریان کلکتور

$i_{C\max} = i_C - I_{CQ} = ۱۳/۷۷ - ۶/۹ = ۶/۸۷mA \simeq ۶/۹ mA$

ج) از قانون تقسیم جریان استفاده می‌کنیم:

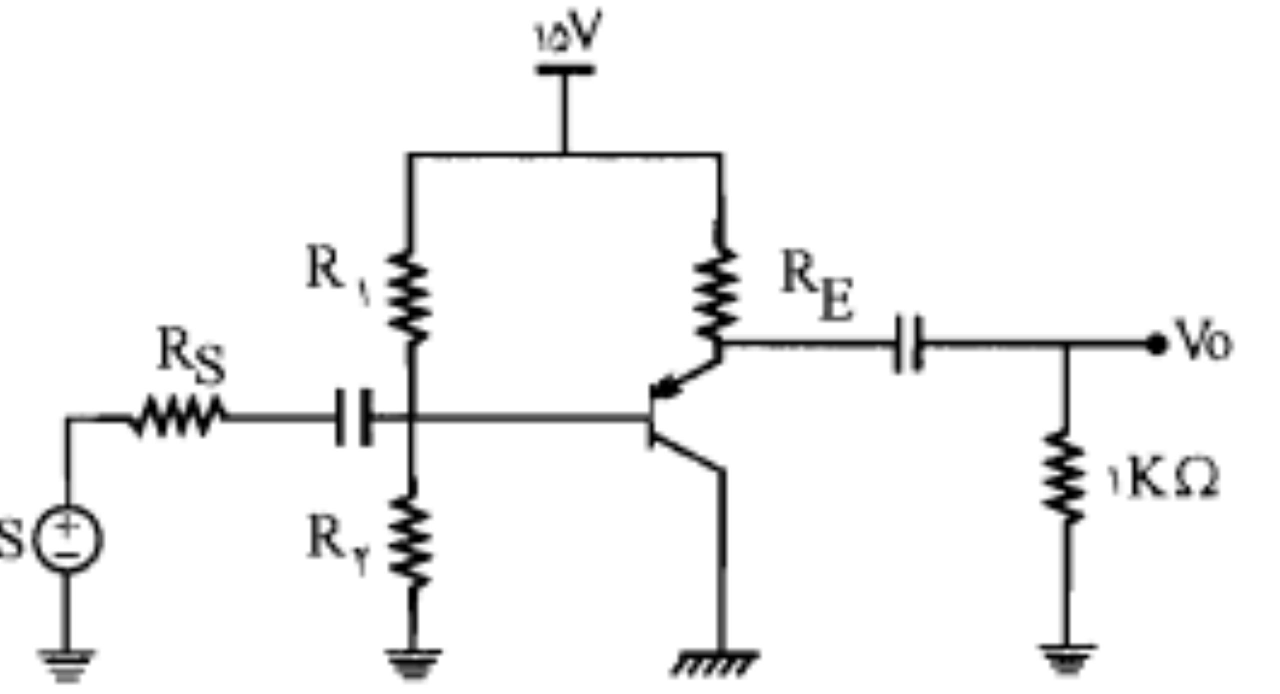
$i_۰ = i_C \times \frac{R_L}{R_C + R_L}$

$i_{۰\max} = i_{C\max} \times \frac{۰/۹K\Omega}{۰/۹K\Omega + ۰/۹K\Omega} = ۶/۹mA \times \frac{۱}{۲} = ۳/۴۵ mA$

۴ـ در مدار شکل م ـ ۴، با فرض $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ و $V_{EB} = ۰/۷V$ و $۵۰ < \beta < ۱۰۰$،

الف) معادل خط بارهای DC و ac را به دست آورید.

ب) مقادیر مقاومت‌های $R_۱$، R_E و $R_۲$ را طوری تعیین کنید که نقطه کار نسبت به تغییرات β پایدار بوده و $V_۰$ بتواند در سیکل مثبت تا ۸ ولت و در سیکل فرض تا ۴ ولت نوسان بدون اعوجاج داشته باشد.



شکل م-۲

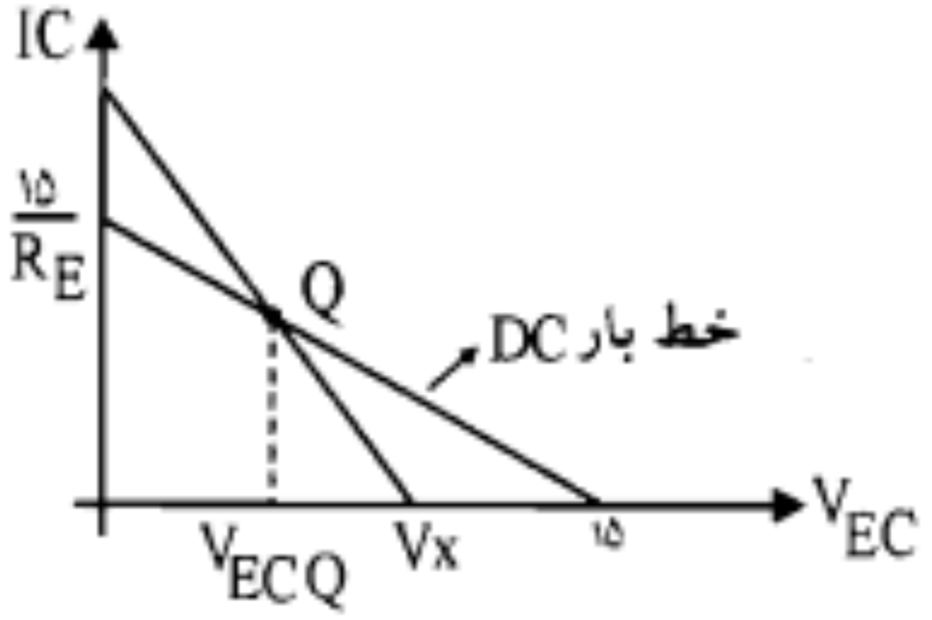
☑ **راه حل:**

الف) DC خط بار: $V_{EC} = V_{CC} - I_C(R_E + R_C) = V_{CC} - I_C R_E = ۱۵ - I_C R_E$

ac خط بار: $V_{EC} - V_{ECQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ})$

از طرفی: $R_{ac} = R_E \| K\Omega = \frac{R_E}{۱ + R_E}$

برای رسم خط بارهای DC و ac ابتدا محل تقاطع این خطوط با V_{CE} و I_C را پیدا می‌کنیم سپس آنها را رسم می‌کنیم.



محل تلاقی خط بار DC با ولتاژ:

$I_C = ۰ \to V_{EC} = V_{CC} = ۱۵$

محل تلاقی خط بار DC با جریان:

$V_{EC} = ۰ \to V_{CC} - I_C R_E = ۰$

$\Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_E} = \frac{۱۵}{R_E}$

محل تلاقی خط بار ac بار ولتاژ: $I_C = ۰ \to V_{EC} = V_{ECQ} + R_{ac} I_{CQ} = V_x$

محل تلاقی خط بار ac با جریان: $V_{EC} = ۰ \to -V_{ECQ} = -R_{ac}(i_c - I_{CQ})$

ب)
$$\begin{cases} V_۰^- = ۴V \\ V_{EC}(sat) = ۰/۲ \end{cases} \to V_{ECQ} - ۰/۲ = ۴ \to V_{ECQ} = ۴/۲ V$$

$V_۰^+ = ۸V \to V_x = ۸ + ۴/۲ = ۱۲/۲ V$

(I) DC خط بار $V_{ECQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = ۱۵ - R_E I_{CQ} \Rightarrow ۱۵ - ۴/۲ = I_{CQ} R_E$

ac خط بار $I_C = ۰ \to V_x = V_{ECQ} + R_{ac} I_{CQ} = ۴/۲ + \frac{R_E}{۱ + R_E} I_{CQ}$

$۱۲/۲ = ۴/۲ + \frac{R_E}{۱ + R_E} I_{CQ} \to ۸ = \frac{R_E}{۱ + R_E} I_{CQ}$ (II)

با استفاده از روابط (I) و (II) داریم:

$۱۰/۸ = ۸(۱ + R_E) \to (۱ + R_E) = ۱/۳۵ \to R_E = ۰/۳۵ K\Omega$

طبق فرض مسئله نقطه کار نسبت به β پایدار بوده در نتیجه داریم:

$R_{th} = \frac{\beta_{\min} R_E}{۱۰} = \frac{۵۰ \times ۰/۳۵}{۱۰} = ۱/۷۵ K\Omega$

www.*PnuEB*.com

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}-۰/۷-V_{th}}{R_E+\frac{R_{th}}{\beta_{av}}}=\frac{۱۵-۰/۷-V_{th}}{۰/۳۵+\frac{۱/۷۵}{\beta_{av}}}\quad (III)$$

$$\beta_{av}=\frac{\beta_۱+\beta_۲}{۲}=\frac{۵۰+۱۰۰}{۲}=۷۵$$

$$V_{ECQ}=V_{CC}-R_E I_{CQ}\rightarrow I_{CQ}=\frac{۱۵-۴/۲}{۰/۳۵}=۳۰/۸۶\ mA$$

$$\overset{(III)}{\rightarrow}۳۰/۸۶=\frac{۱۴/۳-V_{th}}{۰/۳۵+\frac{۱/۷۵}{۷۵}}\rightarrow ۱۴/۳-V_{th}=۱۱/۵۲\rightarrow V_{th}=۲/۷۵\ V$$

از طرفی $V_{th}=\frac{V_{CC}\times R_۲}{R_۱+R_۲}=\frac{۱۵R_۲}{R_۱+R_۲}$

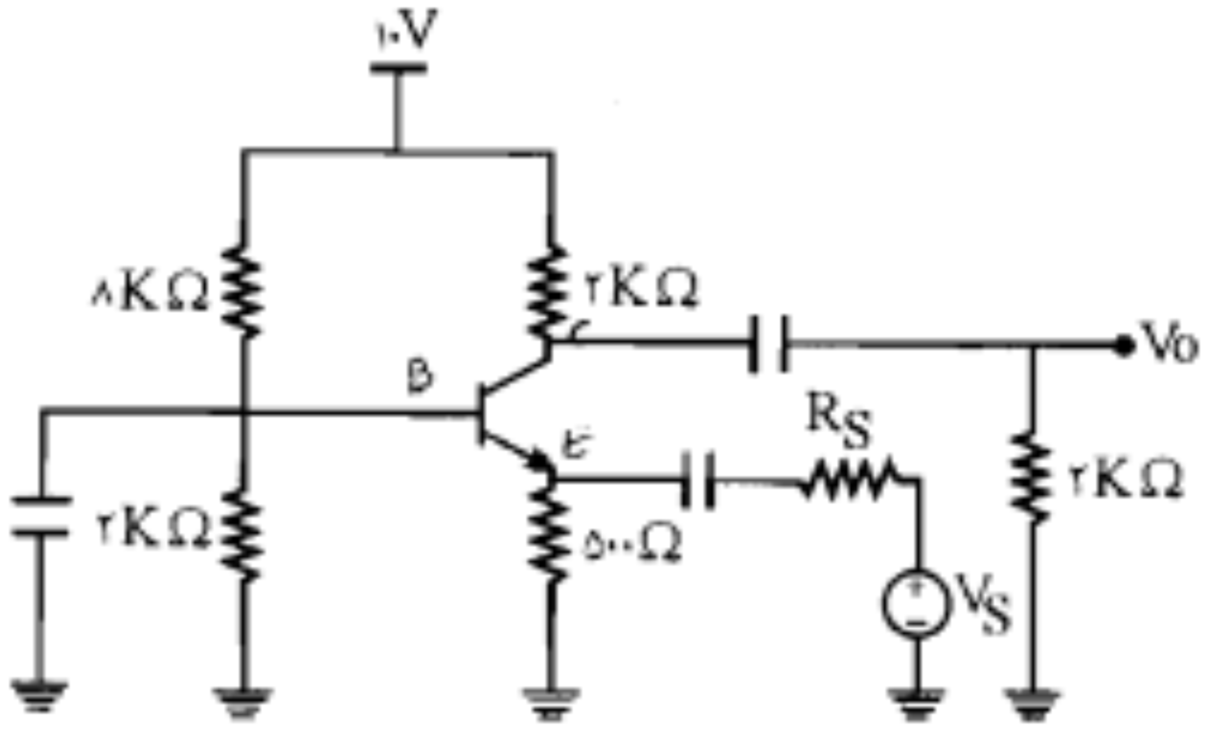
$$R_{th}=R_۱\parallel R_۲=\frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲}=۱/۷۵\rightarrow\frac{R_۲}{R_۱+R_۲}=\frac{۱/۷۵}{R_۱}$$

$$\rightarrow V_{th}=\frac{۱۵\times ۱/۷۵}{R_۱}=۲/۷۵\rightarrow R_۱=۹/۵۴\ K\Omega$$

$$\frac{R_۲}{۹/۵۴+R_۲}=\frac{۱/۷۵}{۹/۵۴}=۰/۱۸\rightarrow R_۲=۱/۷۲+۰/۱۸\,R_۲\rightarrow$$

$$\rightarrow R_۲=۲/۱\ K\Omega$$

۵ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۵ با فرض ۱۰۰ =β و $V_{BE}=۰/۷V$، مختصات نقطه کار و حداکثر دامنه نوسان متقارن $V_۰$ را به دست آورید.



شکل م ـ ۵

☑ **راه حل:**

مدار بیس مشترک است. ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می‌یابیم:

$$V_{th}=\frac{۱۰\times ۲K\Omega}{۲K\Omega+۸K\Omega}=۲V$$

$$R_{th}=۲K\Omega\parallel ۸K\Omega=\frac{۲\times ۸}{۲+۸}=۱/۶\ K\Omega$$

در معادله خط بار ac داریم:

$$I_{CQ}=\frac{V_{th}-V_{BE}}{R_E+\frac{R_{th}}{\beta}}=\frac{۲-۰/۷}{۰/۵+\frac{۱/۶}{۱۰۰}}=۲/۵۲\ mA$$

$$V_{CBQ}=(V_{CC}-V_{BE})-(R_C+R_E)I_C=(۱۰-۰/۷)-(۲+۰/۵)(۲/۵۲)=۳V$$

$$\longrightarrow \text{مختصات نقطه کار}\begin{cases}I_{CQ}=۲/۵۲\ mA\\ V_{CE}=۳V\end{cases}$$

در معادله خط بار ac داریم:

$$V_{CB}-V_{CBQ}=-R_{ac}(i_C-I_{CQ})$$

$$R_{ac}=۲K\Omega\parallel ۲K\Omega=۱K\Omega$$

$$i_C=۰\rightarrow V_{CB}=۳+۲/۵۲=۵/۵۲\,V=V_x$$

به دست اوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن $V_۰$:

$$V_۰^-=V_{CBQ}-V_{CBQ}(sat)$$

$$V_{CB}(sat)=V_{CE}(sat)-V_{BE}(sat)=۰/۲-۰/۸=-۰/۶$$

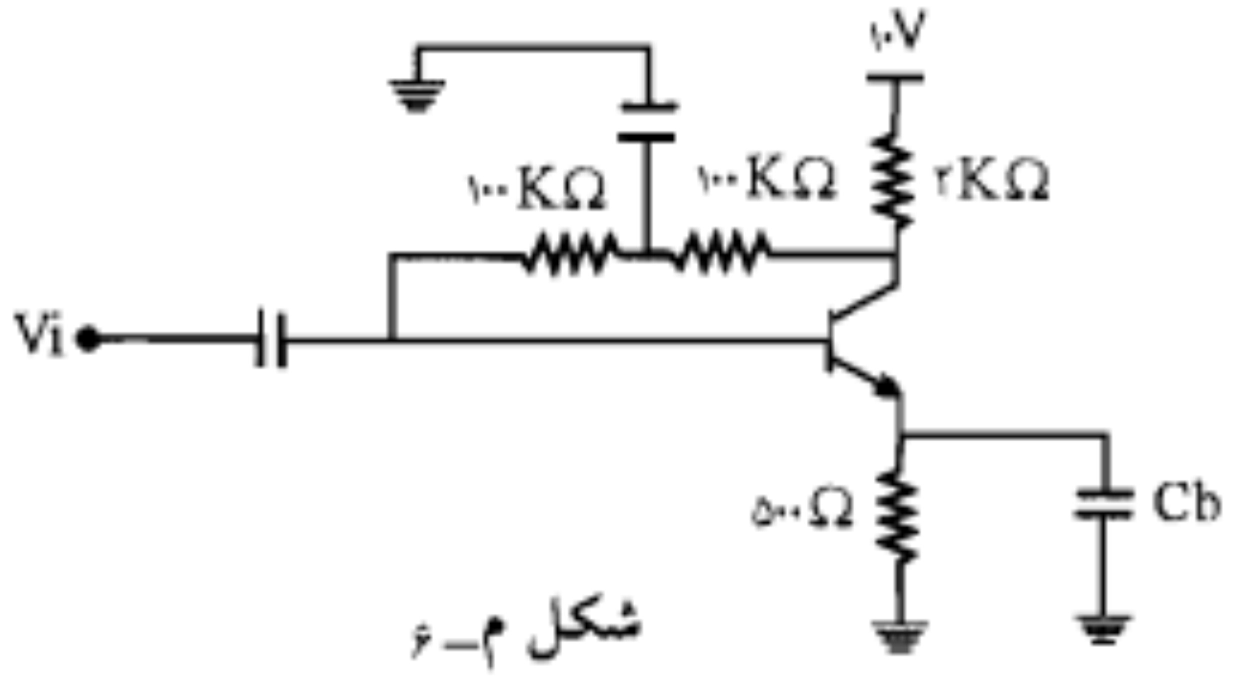
$$\rightarrow V_۰^-=۳V-(-۰/۶)=۳/۶\,V$$

$$V_۰^+=V_x-V_{CBQ}=V_{CB}-V_{CBQ}=۵/۵۲-۳=۲/۵۲\,V$$

$$\rightarrow V_۰\ \text{حداکثر دامنه نوسان متقارن}=V_۰^+=۲/۵۲\,V$$

از دو مقدار به دست آمده کمترین مقدار به عنوان حداکثر دامنه نوسان متقارن $V_۰$ می‌باشد.

۶ـ در مدار شکل م ـ ۶ با فرض ۴۰۰ =β و $V_{CE}(sat)=۰/۲V$، مختصات نقطه کار ترانزیستور را به دست آورید. حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور چقدر است.



شکل م ـ ۶

www.PnuEB.com

☑ راه حل:

معادله خط بار DC:

KVL: $V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = ۱۰ - (۲ + ۰/۵) I_C \quad (I)$

KVL: $۱۰ - ۲(۱+\beta) I_B - ۲۰۰ I_B - ۰/۷ - ۰/۵(۱+\beta) I_B = ۰$

$$\to I_B = \frac{۱۰ - ۰/۷}{(۲ + ۰/۵) \times ۴/۱ + ۲۰۰} = ۷/۷ mA \to I_{CQ} = \beta I_B = ۴۰۰ \times ۷/۷ \mu A = ۳/۰۸ mA$$

$(I) \to V_{CEQ} = ۱۰ - ۲/۵ \times ۳/۰۸ = ۲/۳ V$

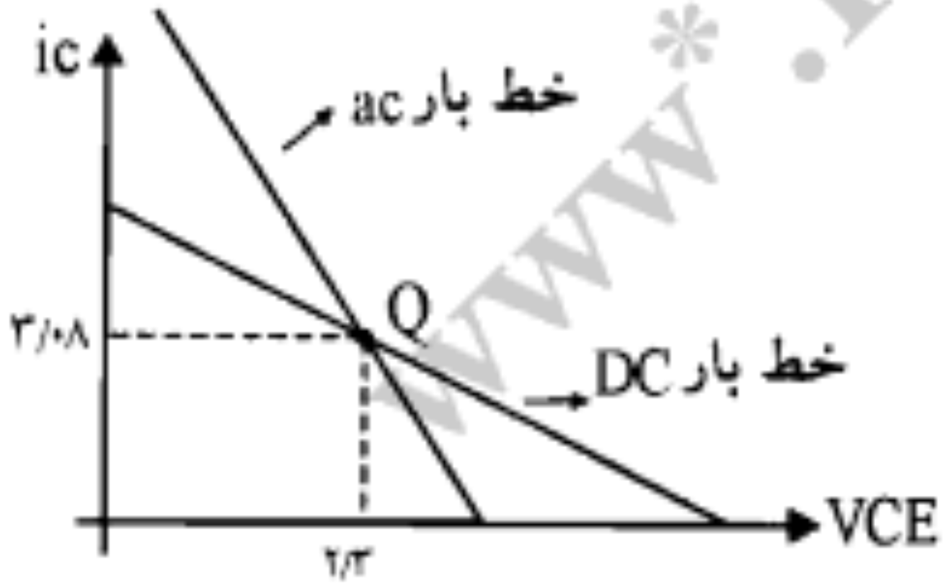
$R_{ac} = ۲K\Omega \parallel ۱۰۰K\Omega = \frac{۲ \times ۱۰۰}{۲ + ۱۰۰} = ۱/۹۶ K\Omega$

معادله خط بار ac : $V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - ۳/۰۸)$

$V_{CE} = ۰ \to i_C = ۴/۲۶ mA$

حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور $i_{C\,max} = i_C - I_{CQ} = ۴/۲۶ - ۳/۰۸ = ۱/۱۸ mA$

مختصات نقطه کار:

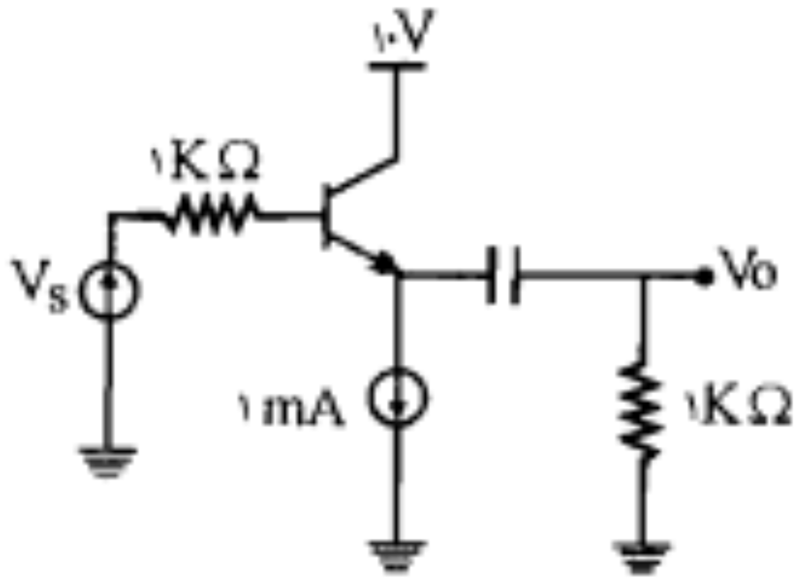


$$\begin{cases} I_{CQ} = ۳/۰۸ mA \\ V_{CEQ} = ۲/۳ V \end{cases}$$

۷ ـ در مدار شکل م ـ ۷، حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s برای هر یک از حالت‌های زیر با فرض $V_{BE} = ۰/۷$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ و $\beta = \infty$ چقدر می‌تواند باشد؟

الف) در سیکل منفی ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.

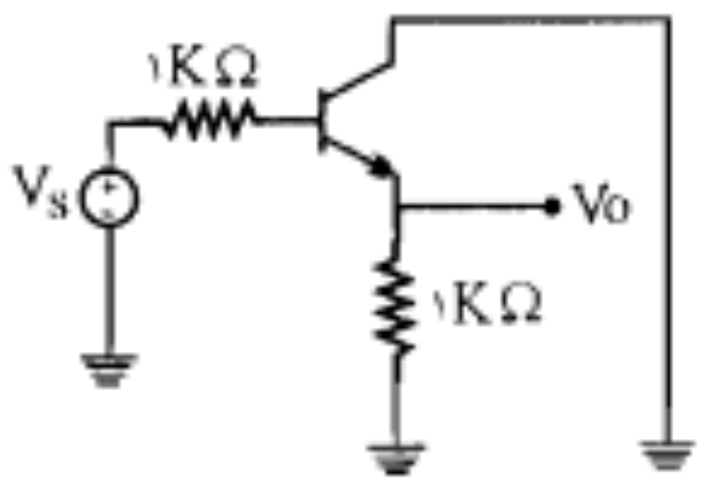
ب) در سیکل مثبت ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.



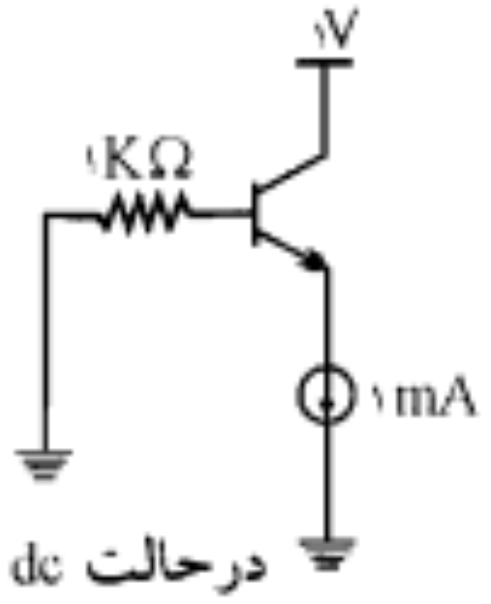
شکل م ـ ۷

☑ راه حل:

الف) مدار معادل DC و ac را رسم می‌کنیم: $I_{CQ} = ۱ mA$



درحالت ac



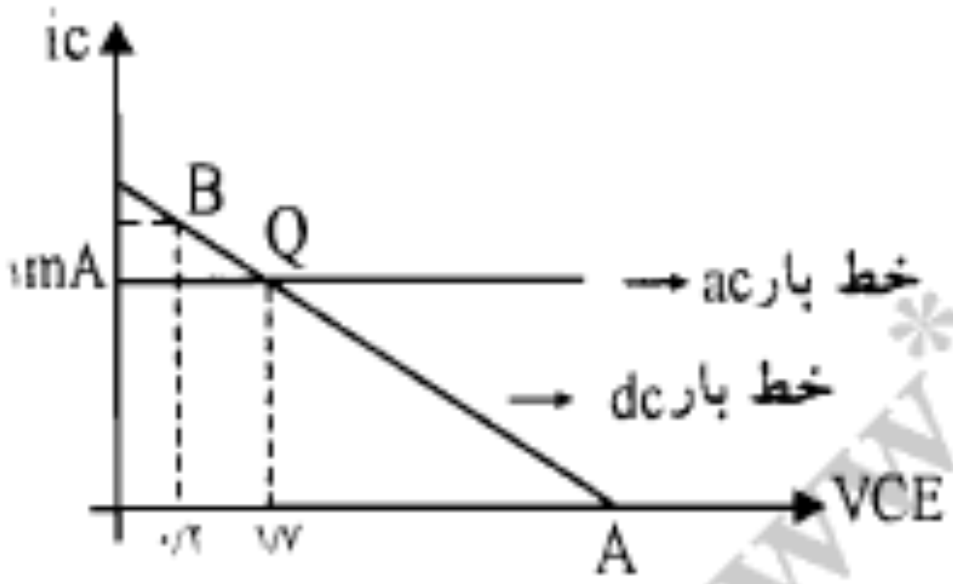
درحالت dc

معادله خط بار DC : $V_{CE} = V_{CB} + B_{BE}$

در مدار dc : $V_B = ۰$ چون $I_B = ۰$ ($\beta = \infty$ می‌باشد). پس داریم:

$V_{CE} = V_C - V_B + V_{BE} = ۱ - ۰ + ۰/۷ = ۱/۷ \quad , \quad I_{CQ} = ۱mA = I_E$

معادله خط بار ac $V_{Ce} = -۱ \times i_C = -i_C$



برای اینکه سیگنال برش نخورد باید: $V_{CE}(B) \le V_{CE} \le V_{CE}(A)$ که نقاط A و B محل تلاقی خط بار ac با $i_C = ۰$ و $V_{CE} = ۰/۲$ می‌باشد:

نقطه A : $i_C = ۰$

نقطه B : $V_{CE} = ۰/۲$

$\Rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -(i_C - I_{CQ})$

$$\begin{cases} V_{CEQ} = ۱/۷۷ \\ I_{CQ} = ۱ mA \end{cases} \qquad \begin{cases} V_{CE}(B) = ۰/۲ \\ V_{CE}(A) = V_{CE}(Q) + I_{CQ} = ۱/۷ + ۱ = ۲/۷ \end{cases}$$

$V_{CE} = V_{ce} + V_{CEQ}$ از طرفی $۰/۲ \le V_{CE} \le ۲/۷$

$\Rightarrow ۰/۲ \le V_{ce} + V_{CEQ} \le ۲/۷ \Rightarrow ۰/۲ \le V_c - V_e + ۱/۷ \le ۲/۷$

www.*PnuEB.com
www.*PnuEB.com

در مدار معادل ac داریم: $V_c = ۰$ و $V_e = V_s$

$$\Rightarrow ۰/۲ \le ۰ - V_s + ۱/۷ \le ۲/۷ \Rightarrow ۰/۲ \le - V_s + ۱/۷ \le ۲/۷$$

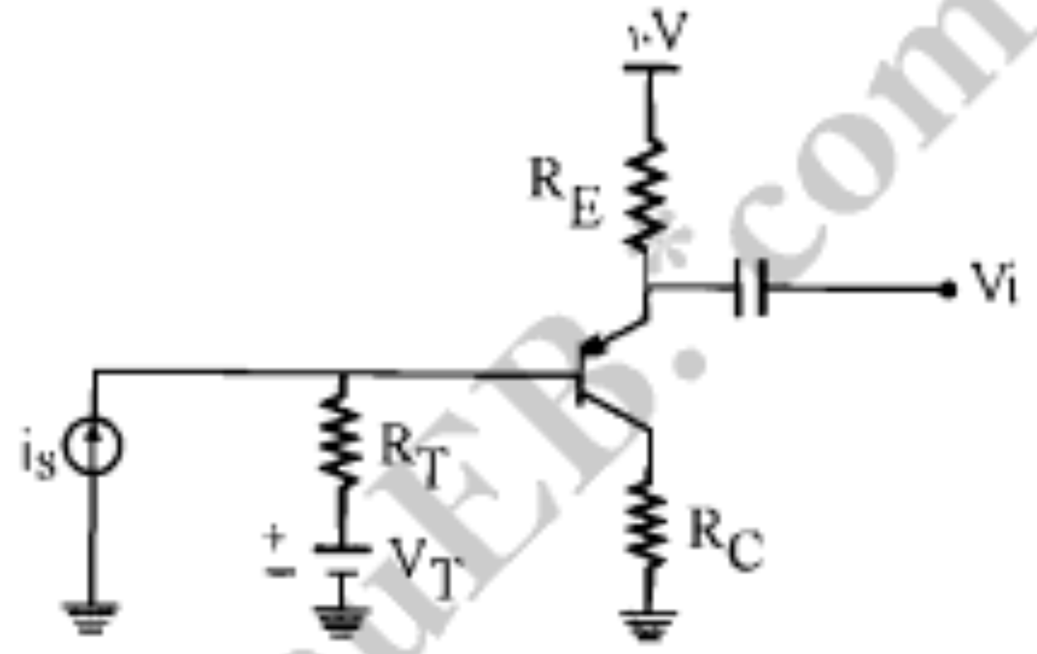
پاسخ خواسته شده به صورت زیر می‌باشد:

الف) $V_s \ge ۱$ در سیکل منفی: $- V_s + ۱/۷ \le ۲/۷ \Rightarrow V_s \ge -۱$

ب) $V_s \le ۱/۵$ در سیکل مثبت: $- V_s + ۱/۷ \ge ۰/۲ \Rightarrow V_s \le ۱/۵$

۸ـ در مدار بیس مشترک شکل م ـ ۸ با شرط پایداری نقطه‌کار نسبت به تغییرات β و اینکه نقطه کار وسط خط بار ac قرار داشته باشد، نشان دهید:

$$\frac{R_C}{R_E} = \frac{V_T}{۲(۹/۳ - V_T)}$$



شکل م ـ ۸

☑ **راه حل:**

معادله خط بار ac: $V_{Cb} - V_{CB} = + R_{ac}(i_C - I_C)$

$i_C = ۰ \to V_{Cb} = V_{CB} - R_{ac} I_C$

از طرفی $R_{ac} = R_C \to V_{Cb} = V_{CB} + R_C I_C$

وقتی نقطه‌کار وسط خط بار ac باشد یعنی دامنه متقارن حداکثر می‌باشد.

(وسط خط بار ac) $V_{CB} = \frac{۱}{۲} V_{Cb}$: برای اینکه حداکثر دامنه متقارن را داشته باشیم

$$\to V_{CB} = \frac{۱}{۲}(V_{CB} - R_C I_C) \to V_{CB} = -R_C I_C \quad (I)$$

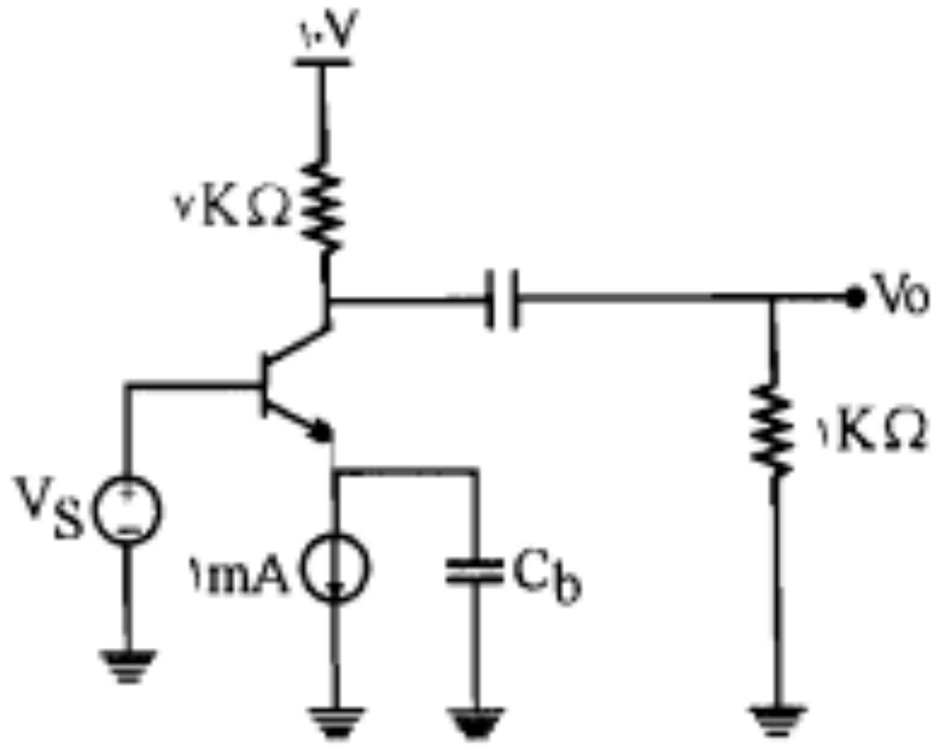
معادله خط بار DC: $-V_T - V_{CB} + R_C I_C = ۰ \quad (II)$

رابطه (I) را در رابطه (II) قرار می‌دهیم $-V_T + R_C I_C + R_C I_C = ۰ \to I_C = \frac{V_T}{۲R_C} \quad (III)$

$$KVL: -۱۰ + R_E I_C + ۰/۷ + V_T = ۰ \to I_C = \frac{۹/۳ - V_T}{R_E} \quad (IV)$$

$$(III), (IV) \Rightarrow \frac{V_T}{۲R_C} = \frac{۹/۳ - V_T}{R_E} \to \frac{R_C}{R_E} = \frac{V_T}{۲(۹/۳ - V_T)}$$

۹ـ برای تقویت کننده شکل م ـ ۹ با فرض $V_{BE} = ۰/۷V$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$ حداکثر ولتاژ مثبت و منفی خروجی چقدر است؟



شکل م ـ ۹

☑ **راه حل:**

حداکثر دامنه ولتاژ مثبت و منفی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} V_o^+ = V_{CE\,max} - V_{CEQ} \\ V_o^- = V_{CEQ} - V_{CE}(sat) \end{cases} \quad (I)$$

با توجه به این روابط مشخص می‌شود که باید معادله خط بار DC و ac را مشخص کنیم.

مختصات نقطه کار:

$$\begin{cases} I_{CQ} = ۱mA \\ V_C = ۱۰ - R_C I_C = ۱۰ - ۷ \times ۱ = ۳V \\ V_{BE} = V_B - V_E \to ۰/۷ = ۰ - V_E \to V_E = -۰/۷V \end{cases} \to V_{CEQ} = V_C - V_E = ۴/۷\,V$$

خط بار ac: $V_{Ce} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ}) \quad (II)$

از طرفی: $R_{ac} = ۷K\Omega \,||\, ۱K\Omega = \frac{۷K\Omega \times ۱K\Omega}{۷K\Omega + ۱K\Omega} = ۰/۸۷۵K\Omega$

$$(II) \to V_{Ce} - ۳/۷ = -۰/۸۷۵(i_C - ۱) \to V_{Ce\,max} = ?$$

$V_{Ce\,max}$ وقتی به دست می‌آید که $i_C = ۰$ باشد.

$$\to V_{Ce\,max} = ۳/۷ + ۰/۸۷۵V = ۴/۵۵v$$

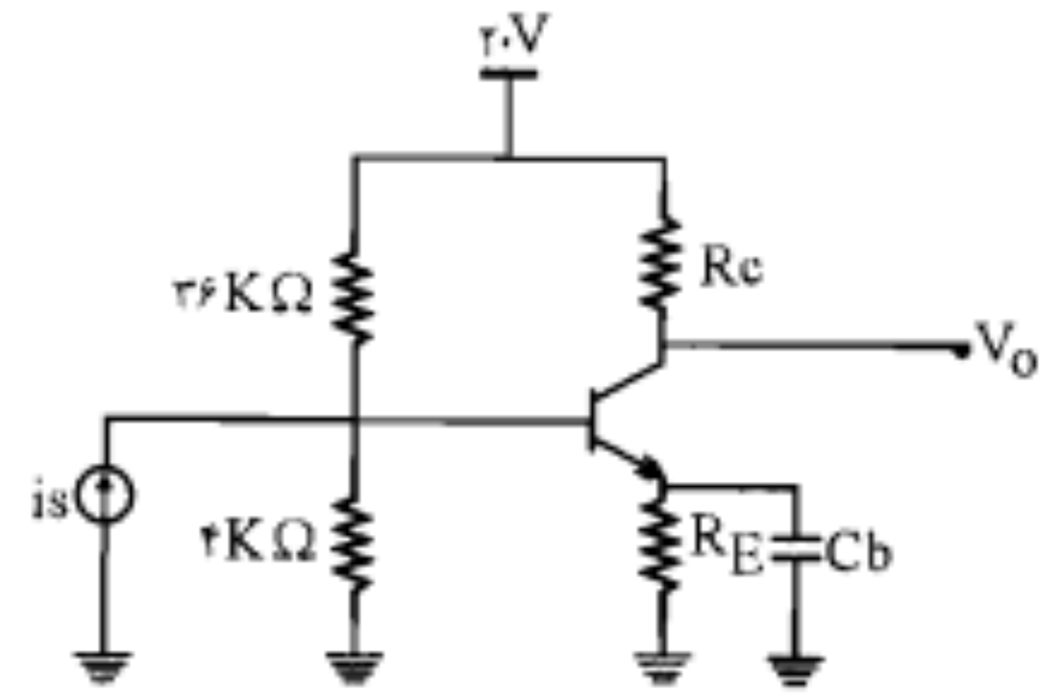
سپس با استفاده از روابط (I) داریم:

$$\begin{cases} V_o^+ = ۴/۵۵ - ۳/۷ = ۰/۸۷۵V \\ V_o^- = ۳/۷ - ۰/۲ = ۳/۵ \end{cases}$$

۱۰ـ در شکل م ـ ۱۰، برای ترانزیستور $۴۰ < \beta < ۶۰$ و $V_{BE} = ۰/۷V$ است. R_C و R_E را طوری

www.PnuEB.com
www.PnuEB.com

تعیین کنید که نقطه کار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و ضمناً دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر شود. حداکثر دامنه نوسان خروجی چقدر است؟



شکل م-۱۰

☑ راه حل:

مدار معادل تونن ورودی:

$$\begin{cases} V_{th} = \frac{۴ \times ۲۰}{۴ + ۳۶} = ۲V \\ R_{th} = ۴K\Omega \parallel ۳۶K\Omega = \frac{۴ \times ۳۶}{۴ + ۳۶} = ۳/۶ K\Omega \end{cases}$$

طبق فرض مسئله داریم نقطه کار نسبت به تغییرات β پایدار می‌باشد پس داریم:

$$R_{th} = \frac{\beta_{min} R_E}{۱۰} \rightarrow ۳/۶ K\Omega = \frac{۴۰ R_E}{۱۰} \rightarrow R_E = ۰/۹ K\Omega$$

$$KVL: I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E} = \frac{۲ - ۰/۷}{۰/۹} = \frac{۱/۳}{۰/۹} = ۱/۴۴ mA$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان خروجی:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} \qquad \begin{cases} R_{ac} = R_C \\ R_{DC} = R_C + R_E \end{cases}$$

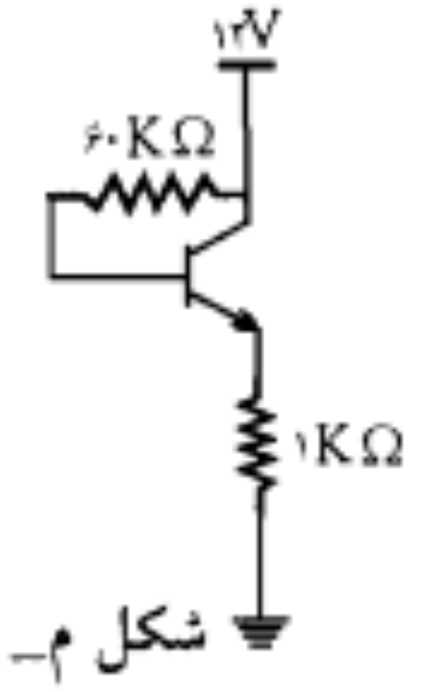
$$\rightarrow I_{CQ} = ۱/۴۴ mA = \frac{۲۰}{R_C + R_C + ۰/۹} = \frac{۲۰}{۲R_C + ۰/۹} \rightarrow ۲/۸۸ R_C + ۱۲/۹۶ = ۲۰$$

$$\rightarrow R_C = ۶/۴۷ K\Omega$$

$$V_O^+ = V_{CE} - V_{CEQ} \Rightarrow \begin{cases} ac \text{ خط بار } : V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(I_C - I_{CQ}) \\ I_C = ۰ \rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -۶/۴۷(۰ - ۱/۴۴) = ۹/۳۲ \end{cases}$$

$$\rightarrow V_O^+ = ۹/۳۲$$

۱۱ـ در مدار شکل م ـ ۱۱، با فرض $V_{BE} = ۰/۷V$ و $۵۰ < \beta < ۲۰۰$، تغییرات جریان کلکتور نقطه کار را محاسبه کنید.



شکل م-۱۱

☑ راه حل:

طبق روابط (۵ـ۵۷) و (۵ـ۴۳) کتاب داریم:

$$S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} = \frac{I_{C_۱}}{\beta_۱} \left[\frac{R_T + R_E}{R_T + (۱ + \beta_۲) R_E} \right]$$

از طرفی در این مدار (شکل م - ۱۱) داریم:

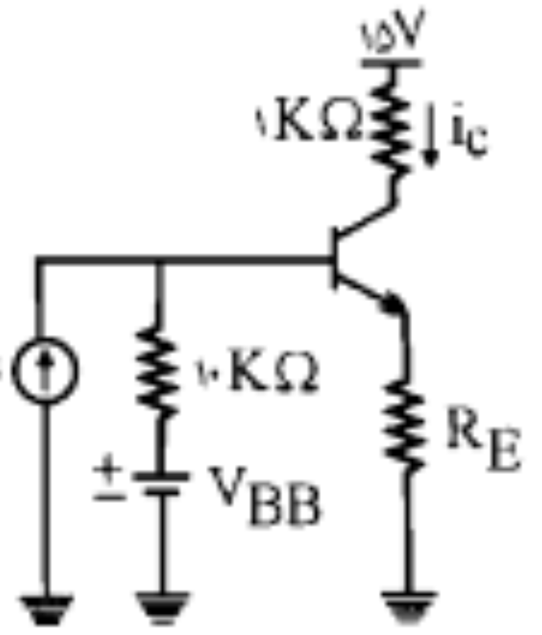
$$\begin{cases} V_T = ۱۲V \\ R_T = ۶۰ K\Omega \end{cases}$$

$$KVL: I_{C_۱} = \frac{۱۲ - ۰/۷}{۱K\Omega + \frac{۶۰}{۵۰}} = ۵/۱۳ mA$$

داریم: $S_\beta = \frac{۵/۱۳}{۵۰} \left[\frac{۶۰ + ۱}{۶۰ + (۱ + ۲۰۰) \times ۱} \right] = ۰/۰۲۴$

$$\Delta \beta = ۲۰۰ - ۵۰ = ۱۵۰ \rightarrow \Delta I_C = S_\beta \times \Delta \beta = ۰/۰۲۴ \times ۱۵۰ = ۳/۶ mA$$

۱۲ـ در تقویت کننده شکل م ـ ۱۲ می‌خواهیم تقویت کننده را طوری طراحی نماییم که دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور حداکثر باشد. اگر برای ترانزیستور به کار رفته β بین ۵۰ تا ۱۵۰ تغییر کند و $V_{BE} = ۰/۷V$ باشد، V_{BB} و R_E را محاسبه نمایید. حداکثر دامنه نوسان i_C را به دست آورید.



شکل م-۱۲

☑ راه حل:

$$R_T = \frac{\beta_{min} R_E}{۱۰} = \frac{۵۰ \times R_E}{۱۰} = ۱۰ \rightarrow R_E = ۲K\Omega$$

www.PnuEB.com

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور:

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}}{R_{ac}+R_{DC}} \qquad \begin{cases}R_{ac}=R_C+R_E\\ R_{DC}=R_C+R_E\end{cases}$$

$$I_{CQ}=\frac{۱۵}{۲R_C+۲R_E}=\frac{۱۵}{۲+۴}=\frac{۱۵}{۶}=۲/۵\,mA$$

۲/۵ mA = حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور $\longrightarrow$

$$I_C=\frac{V_{BB}-۰/۷}{R_E+\frac{R_B}{\beta_{av}}}=\frac{V_{BB}-۰/۷}{۲+\frac{۱۰}{۱۰۰}}=۲/۵\,mA$$

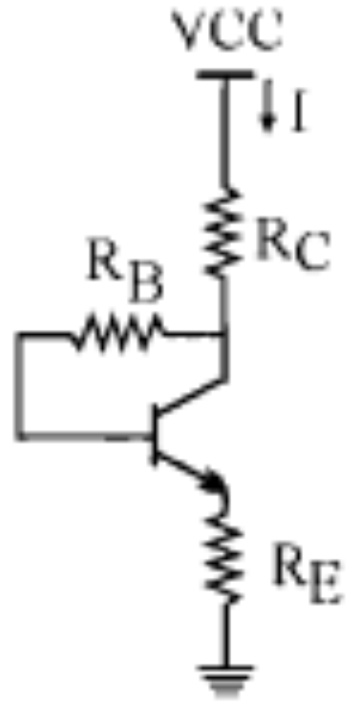
$$\rightarrow ۲/۵=\frac{V_{BB}-۰/۷}{۲/۱}\Rightarrow V_{BB}=۵/۹۵^{v}$$

$$\beta_{av}=\frac{۵۰+۱۵۰}{۲}=۱۰۰$$

۱۳ـ در مدار شکل م ـ ۱۳

الف) ضرایب پایداری جریان نقطه کار را نسبت به تغییرات V_{BE} و I_{CBO} را به دست آورید.

ب) با فرض $R_E=۰$ ، حسسایت نقطه کار نسبت به تغییرات دو عامل فوق چگونه است؟ چرا؟



شکل م ـ ۱۳

☑ راه حل:

الف) $KVL: R_C I+R_B I_B+R_E I_E=V_{CC}-V_{BE}$

از طرفی: $I=I_B+I_C=I_E$

$$\Rightarrow R_C I_E+R_B I_B+R_E I_E=V_{CC}-V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_E(R_C+R_E)+R_B I_B=V_{CC}-V_{BE}$$

$$\Rightarrow (I_B+I_C)(R_C+R_E)+R_B I_B=V_{CC}-V_{BE}\Rightarrow (R_C+R_E)I_C+(R_C+R_B+R_E)I_B=V_{CC}-V_{BE}$$

از طرفی داریم:

$$I_B=\frac{I_C-(۱+\beta)I_{CO}}{\beta}\ \Leftarrow\ I_C=\beta I_B+(۱+\beta)I_{CO}$$

$$\Rightarrow (R_C+R_E)I_C+(R_C+R_E+R_B)\left(\frac{I_C-(۱+\beta)I_{CO}}{\beta}\right)=V_{CC}-V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_C\left((R_C+R_E)\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)+R_B\times\frac{۱}{\beta}\right)=V_{CC}-V_{BE}+\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)(R_C+R_E+R_B)I_{CO}\ (I)$$

حال از رابطه (I) نسبت به V_{BE} مشتق می‌گیریم و بقیه عوامل را ثابت در نظر می‌گیریم:

$$\Rightarrow dIC\left((R_C+R_E)\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)+\frac{R_B}{\beta}\right)=-dV_{BE}$$

$$\Rightarrow S_V=\frac{dI_C}{dV_{BE}}=\frac{-\beta}{(R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E))}$$

حال از رابطه (I) نسبت به I_{CO} مشتق می‌گیریم و بقیه عوامل را ثابت فرض می‌کنیم:

$$dI_C\left((R_C+R_E)\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)+\frac{R_B}{\beta}\right)=\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)(R_C+R_E+R_B)dI_{CO}$$

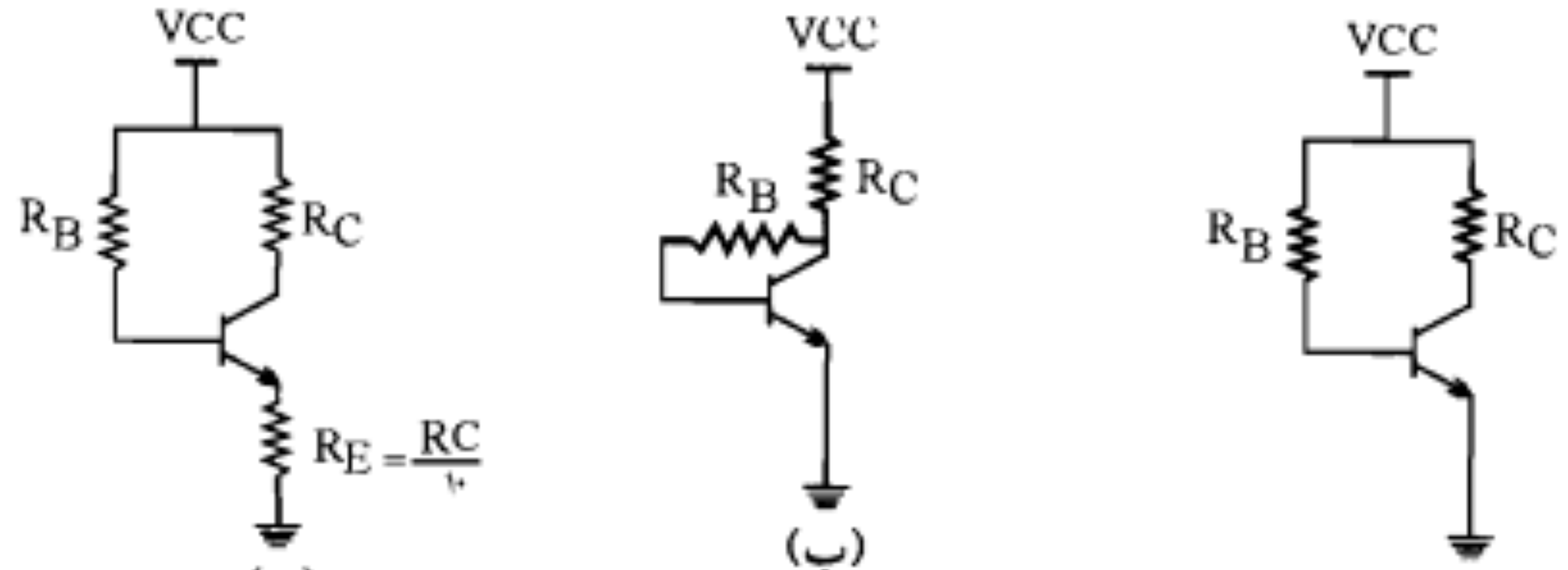
$$S_I=\frac{dI_C}{dI_{CO}}=\frac{(R_C+R_E+R_B)}{R_C+R_E+\frac{R_B}{۱+\beta}}=\frac{(۱+\beta)(R_C+R_E+R_B)}{(۱+\beta)(R_C+R_E)+R_B}$$

ب) با فرض $R_E=۰$ $\Leftarrow$

$$S_V=\frac{-\beta}{R_B+(۱+\beta)R_C}\quad ,\quad S_I=\frac{(R_C+R_B)(۱+\beta)}{(۱+\beta)R_C+R_B}$$

در این حالت S_I و S_V هر دو بزرگ شدند در نتیجه از پایداری نقطه کار کاسته می‌شود.

۱۴ـ ضرایب پایداری S_I و S_V و S_β را برای سه مدار شکل م ـ ۱۴ به دست آورده و با هم مقایسه نمایید.



شکل م ـ ۱۴

www.PnuEB.com

☑ راه حل:

الف) مدار (الف) مدار بایاس امیتر مشترک است:

$$\begin{cases} R_T = R_B \\ V_T = V_{CC} \\ R_E = 0 \end{cases}$$

طبق رابطه (۵ ـ ۵۰) کتاب داریم:

$$S_I = (1+\beta)\frac{R_T+R_E}{(1+\beta)R_E+R_T}$$

$$\to S_I = (1+\beta)\frac{R_B+0}{(1+\beta)\times 0+R_B} = (1+\beta)$$

رابطه (۵ ـ ۵۴) کتاب:

$$S_V = \frac{-\beta}{R_E(1+\beta)+R_T} = \frac{-\beta}{R_B}$$

رابطه (۵ ـ ۵۷) کتاب:

$$S_B = \frac{I_{C_1}}{\beta_1}\left[\frac{R_T+R_E}{R_T+(1+\beta_2)R_E}\right] = \frac{I_{C_1}}{\beta_1}\times\left(\frac{R_B}{R_B}\right) = \frac{I_{C_1}}{\beta_1}$$

ب) این مدار، مدار مسئله (۱۳) در قسمت ب می‌باشد:

$$S_I = \frac{(1+\beta)(R_B+R_C)}{R_B+(1+\beta)R_C}$$

$$S_V = \frac{-\beta}{R_B+(1+\beta)R_C} \quad , \quad S_B = \frac{\Delta I_C}{\Delta\beta} = \frac{I_{C_1}}{\beta_1}\left(\frac{R_B+R_C}{R_B+(1+\beta)R_C}\right)$$

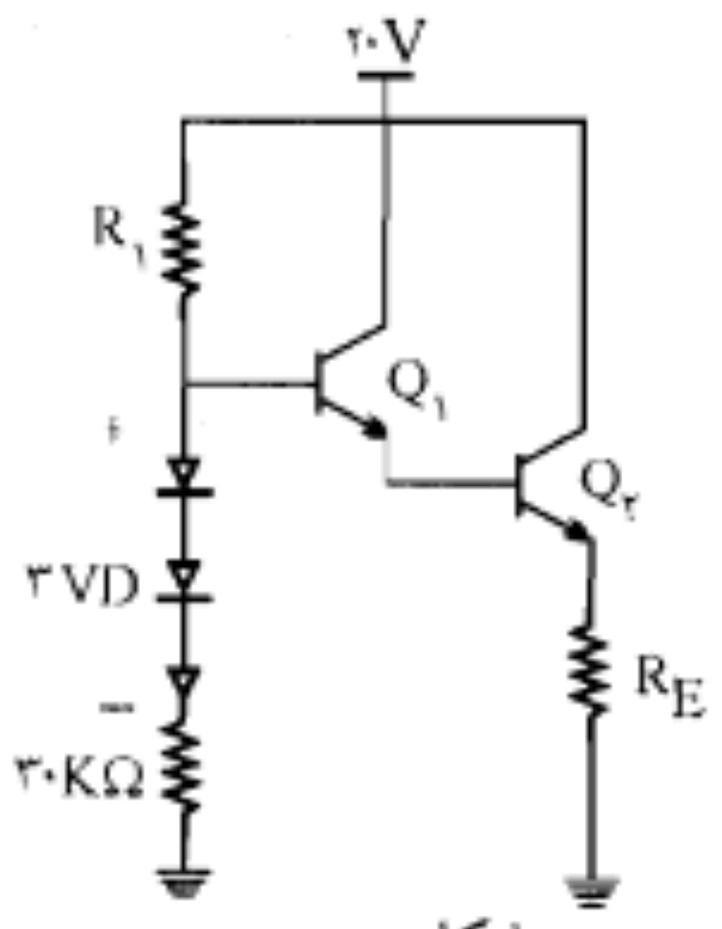
ج) مدار (ج) را هم می‌توان مدار خود بایاس در نظر گرفت؛ پس روابط (۵ ـ ۵۰) و (۵ ـ ۵۴) و (۵ ـ ۵۷) در مورد این مدار هم صدق می‌کند.

$$S_I = \frac{(1+\beta)(R_B+\frac{R_C}{10})}{(1+\beta)\frac{R_C}{10}+R_B} = (1+\beta)\frac{R_B+0.1R_C}{(1+\beta)\times 0.1R_C+R_B}$$

$$S_\beta = \frac{I_{C_1}}{\beta_1}\left[\frac{R_B+0.1R_C}{R_B+(1+\beta_2)\times 0.1R_C}\right] \quad \text{و} \quad S_V = \frac{-\beta}{R_B+0.1(R_C)(1+\beta)}$$

مدار (ب) به علت دارا بودن فیدبک در کلکتور و مدار (ج) به علت وجود مقاومت R_E پایداری بهتری نسبت به مدار الف دارند به همین علت ضرایب پایداری آنها کوچکتر است.

۱۵ ـ در مدار شکل م ـ ۱۵ ترانزیستورها مشابه و دیودها از نظر تغییرات حرارتی مشابه پیوندهای بیس ـ امیتر ترانزیستورها هستند. آیا می‌توان R_1 را طوری تعیین کرد که تغییرات حراتی I_E صفر شود؟ (محاسبه کنید) اگر $100 > \beta_1 = \beta_2 > 50$ باشد، R_E را طوری تعیین کنید که نقطه کار پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشد ($V_D = V_{BE} = 0/77V$)



شکل م ـ ۱۵

☑ راه حل:

مدار معادل ورودی را می‌یابیم:

$$\begin{cases} V_{th} = 20\times\frac{30}{30+R_1} + 3V_D\times\frac{R_1}{R_1+30} = \frac{600+3V_D R_1}{R_1+30} \\ R_{th} = R_1 \parallel 30\ K\Omega \quad , \quad \beta_{ab} = \frac{50+100}{2} = 75 \end{cases}$$

$$I_C = \frac{V_{th}-2V_{BE}}{\frac{R_{th}}{(\beta_{av})^2}+R_E} = \frac{\frac{600+3V_D R_1}{R_1+30} - 2\times V_{BE}}{\frac{R_{th}}{(75)^2}+R_E}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{3R_1}{R_1+30}\times\frac{\partial V_D}{\partial T} - \frac{2\partial V_{BE}}{\partial T} \qquad (I)$$

از طرفی داریم $V_D = V_{BE} \to \frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$

پس $(I) \to \frac{3R_1}{R_1+30} - 2 = 0 \to 3R_1 = 2R_1+60 \to R_1 = 60K\Omega$

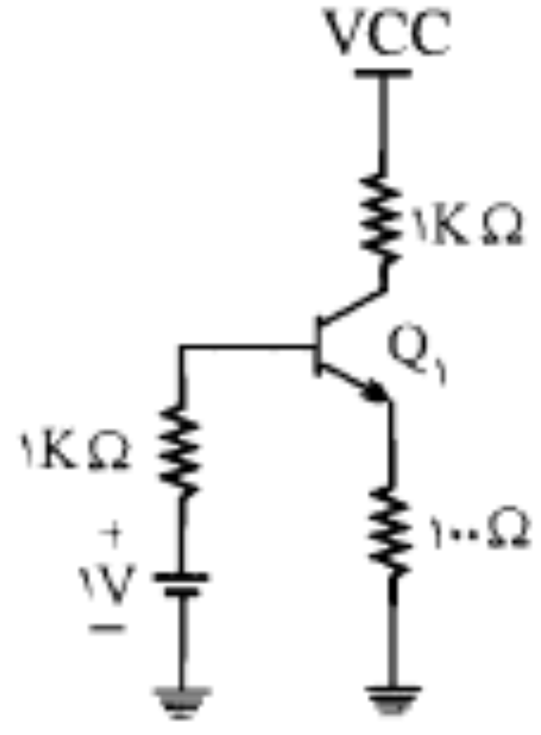
برای اینکه نقطه کار پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشد باید داشته باشیم:

$$R_{th} = \frac{(1+\beta_{min})^2 R_E}{10} = \frac{(1+50)^2\times R_E}{10} = R_{th} = R_1 \parallel 30 = 60 \parallel 30 = 20$$

$$\to R_E = 77\Omega$$

www.PnuEB.com

۱۶ـ در مدار شکل م ـ ۱۶، با فرض $200 > \beta > 50$، $25°C < T < 75°C$، $V_{CC} = 6 \pm 0.2V$، $I_{CBO} = 0.01\ \mu A$ در $25°C$ و $V_{BE} = 0.7V$، جریان کلکتور، ضرایب پایداری و تغییرات جریان کلکتور را در بدترین حالت محاسبه کنید.



شکل م ـ ۱۶

☑ **راه حل:**

$$I_{CQ} = \frac{V_T - V_{BE}}{R_E + \frac{R_T}{\beta_{av}}}$$

از طرفی: $\beta_{av} = \frac{50 + 200}{2} = 125$

پس داریم: $I_{CQ} = \frac{1 - 0.7}{0.1 + \frac{1}{125}} = 2.77mA$

ضرایب پایداری: (از روابط صفحه ۱۸۶ استفاده می‌کنیم چون این دو مدار مشابه هستند.)

$$S_I = 1 + \frac{R_T}{R_E} = 1 + \frac{1}{0.1} = 11$$

$$S_V = \frac{-1}{R_E} = \frac{-1}{0.1} = -10$$

$$S_\beta = \frac{I_{CQ_1}}{\beta_1}\left[\frac{R_T + R_E}{R_T + (1+\beta_2)R_E}\right] = \frac{I_{CQ_1}}{50}\left[\frac{1 + 0.1}{1 + (1 + 200)\times 0.1}\right]$$

از طرفی: $I_{CQ_1} = \frac{V_T - V_{BE}}{R_E + \frac{R_T}{\beta_1}} = \frac{1 - 0.7}{0.1 + \frac{1}{50}} = 2.5$

$$\rightarrow S_\beta = \frac{2.5}{50}\left[\frac{1.1}{1 + 20.1}\right] = \frac{1}{200} \times \frac{11}{201} = 2.7 \times 10^{-3}$$

برای به دست آوردن تغییرات جریان کلکتور از رابطه (۵ ـ ۷۱) استفاده می‌کنیم.

$$\Delta I_{CQ} = |S_I \Delta I_{CBO}| + |S_V \Delta V_{BE}| + |S_\beta \Delta\beta| + |S_{V_{CC}} \Delta V_{CC}| + |S_{R_E} \Delta R_E|$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO} \times 2^{\frac{\Delta T}{10}} = 0.01\mu A \times 2^{\frac{50}{10}} = 32 \times 0.01\mu A = 32 \times 10^{-5}$$

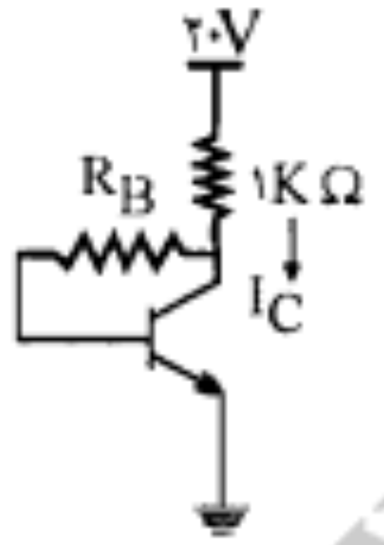
$$\Delta V_{BE} = -2.5\Delta T = -2.5 \times 50 = -125mV \quad , \quad \Delta\beta = 150$$

$$\Delta V_{CC} = 0.4V \qquad \Delta R_E = 0$$

تغییرات V_{CC} در I_C تأثیری ندارد مگر اینکه اثر مدولاسیون عرض بین را در نظر بگیریم که ضرورتی ندارد.

$$\Delta I_{CQ} = 11 \times 32 \times 10^{-5} + |(-10)| \times |(-125)| \times 10^{-3} + 2.7 \times 10^{-3} \times 150 = 1.65mA$$

۱۷ـ در مدار شکل م ـ ۱۷، R_B را طوری محاسبه کنید که $I_{CQ} = 10\ mA$ شود. ضرایب پایداری S_I و S_V و S_β را به دست آورید. تغییرات نقطه کار را با فرض $I_{CBO} = 1\mu A$ (در دمای $25°C$) برای $200 > \beta > 50$ و $25°C < T < 100°C$ محاسبه نمایید.



شکل م ـ ۱۷

☑ **راه حل:**

$$\beta_{av} = \frac{200 + 50}{2} = 125$$

$$KVL: 20 - 1K\Omega\,(I_B + I_C) - R_B I_B - V_{BE} = 0 \rightarrow$$

$$\begin{cases} 20 - I_B - I_C - R_B I_B - 0.7 = 0 \quad (I) \\ I_{CQ} = 10mA\ ;\ I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{I_{CQ}}{\beta_{av}} = \frac{10mA}{(\frac{50 + 200}{2})} = 8 \times 10^{-2}\ mA \end{cases}$$

$$(I): 19.3 - 8 \times 10^{-2} - 10 - R_B \times 8 \times 10^{-2} = 0 \rightarrow$$

$$R_B = 115.25K\Omega \qquad I_{C_1} = \frac{20 - 0.7}{R_C + \frac{R_B}{\beta_1}} = 5.8mA$$

www.PnuEB.com

برای به دست آوردن S_I و S_V و S_B از روابطی که در مسئله ۱۴ (ب) به دست آوریم، استفاده می‌کنیم:

$$S_I = \frac{(۱+\beta_{av})(R_B+R_C)}{R_B+(۱+\beta_{ab})R_C} = \frac{(۱+۱۲۵)(۱۱۵/۲۵+۱)}{(۱۱۵/۲۵)+(۱+۱۲۵)\times ۱} = \frac{۱۴۶۴۷/۵}{۲۴۱/۲۵} = ۶۰/۷$$

$$S_V = \frac{-\beta_{av}}{R_B+(۱+\beta_{av})R_C} = \frac{-۱۲۵}{۱۱۵/۲۵+۱۲۶} = -۰/۵۲$$

$$S_\beta = \frac{I_{C_۱}}{\beta_۱}\left(\frac{R_B+R_C}{R_B+(۱+\beta_۲)R_C}\right) = \frac{۵/۸}{۵۰}\left(\frac{۱۱۵/۲۵+۱}{۱۱۵/۲۵+۲۰۱\times ۱}\right) = ۰/۰۴۲۹$$

$$\Delta I_{CBO} = ۱\mu A \times ۲^{\frac{۷۵}{۱۰}} = ۰/۱۸mA$$

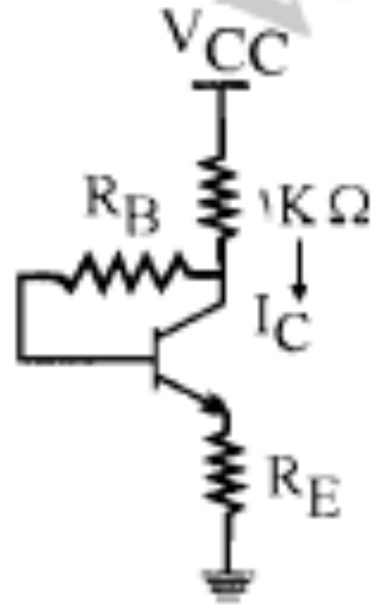
$$\Delta V_{BE} = -۲/۵ \times \Delta T = ۰/۱۸۷V$$

$$\rightarrow \Delta I_C = |S_V \times \Delta V_{BE}| + |S_I \times \Delta I_{CBO}| + |S_\beta \times \Delta\beta|$$

$$\rightarrow \Delta I_C = |(-۰/۵۱)| \times |(-۰/۱۸۷)| + |۶۰/۷ \times ۰/۱۸| + |۰/۰۴۲۹ \times ۱۵۰|$$

$$= ۱۷/۴\ mA$$

۱۸ ـ اگر در مدار شکل م ـ ۱۷، مقاومت R_E را به امیتر اضافه کنیم. نشان دهید جریان کلکتور نقطه کار از رابطه زیر به دست می‌آید:



$$I_{CQ} = \frac{\beta(R_E+R_B+R_C)I_{CBO}+\beta(V_{CC}-V_{BE})}{R_B+(۱+\beta)(R_E+R_C)}$$

همچنین S_I و S_V و S_β را محاسبه کنید.

☑ **راه حل:**

$$KVL: -V_{CC}+R_C(I_B+I_C)+R_B I_B+V_{BE}+R_E(I_C+I_B)=۰$$

$$\rightarrow V_{CC}-V_{BE} = (R_C+R_B+R_E)I_B+(R_C+R_E)I_C \qquad (I)$$

از طرفی داریم: $I_B = \frac{I_C}{\beta} - I_{CBO}\frac{\beta+۱}{\beta} \qquad (II)$

رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم.

$$(I) \rightarrow V_{CC}-V_{BE} = (R_C+R_B+R_E)\left(\frac{I_C}{\beta}-I_{CBO}\frac{\beta+۱}{\beta}\right)+(R_C+R_E)I_C$$

$$=(R_C+R_B+R_E)\left(\frac{I_C}{\beta}\right)-I_{CBO}\left(\frac{\beta+۱}{\beta}\right)(R_C+R_B+R_E)+(R_C+R_E)I_C$$

$$=I_C\left(\frac{R_C+R_B+R_E}{\beta}+(R_C+R_E)\right)-I_{CBO}\left(\frac{\beta+۱}{\beta}\right)(R_C+R_E+R_B)$$

$$\rightarrow I_C\left[\frac{R_C+R_B+R_E}{\beta}+(R_C+R_E)\right] = (V_{CC}-V_{BE})+I_{CBO}\left(\frac{\beta+۱}{\beta}\right)(R_C+R_E+R_B)$$

$$\rightarrow I_C = \frac{(V_{CC}-V_{BE})+\left(I_{CBO}\left(\frac{\beta+۱}{\beta}\right)(R_C+R_E+R_B)\right)}{\frac{(R_B+R_C+R_E)}{\beta}+(R_C+R_E)}$$

$$\rightarrow I_C = (V_{CC}-V_{BE})\times\frac{\beta}{R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E)}+\frac{I_{CBO}\times\beta(R_B+R_C+R_E)}{R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E)}$$

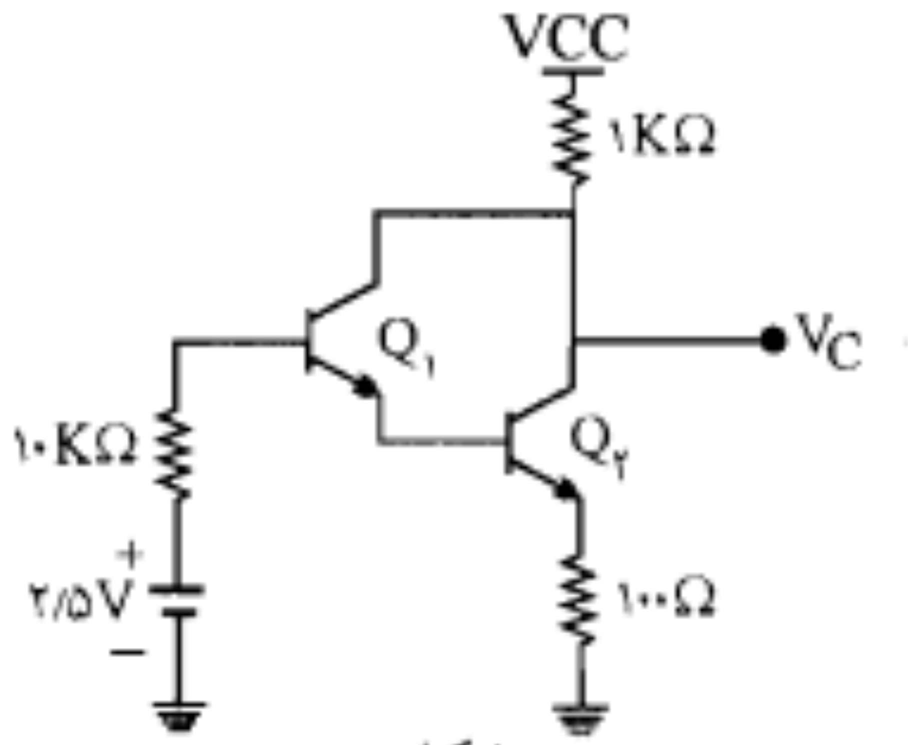
$$\rightarrow I_C = \frac{\beta(V_{CC}-V_{BE})+I_{CBO}\times(R_B+R_C+R_E)\beta}{R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E)}$$

S_I و S_V و S_β در مسئله ۱۳ (الف) محاسبه شده‌اند:

$$S_I = \frac{(۱+\beta)(R_B+R_C+R_E)}{R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E)} \qquad S_V = \frac{-\beta}{R_B+(۱+\beta)(R_C+R_E)}$$

$$S_\beta = \frac{I_{C_۱}}{\beta_۱}\left[\frac{R_T+R_E}{R_T+(۱+\beta_۲)R_E}\right]$$

۱۹ ـ در تقویت کننده مدار شکل م ـ ۱۹، ترانزیستورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ مشابه و از جنس سیلیکن می‌باشند. برای این ترانزیستورها در دمای $۲۵^\circ C$ ، $I_{CBO} = ۰/۱\mu A$ و $V_{BE} = ۰/۷V$ است. با فرض $\beta = ۲۰$ ، تغییرات ولتاژ V_C را وقتی دما از $۲۵^\circ C$ تا $۱۰۰^\circ C$ تغییر نماید محاسبه کنید.



شکل م ـ ۱۹

www.*PnuEB.*com

☑ **راه حل:** در این مدار دو ترانزیستور به صورت زوج دارلینگتون قرار گرفته‌اند β معادل برابر $\beta^۲$ خواهد شد و ΔV_{BE} نیز دو برابر می‌شود. I_{CBO} مربوط به $Q_۱$ از بیس $Q_۲$ می‌گذرد پس $\frac{۱}{\beta}$ برابر I_{CBO} مربوط به $Q_۲$ است پس I_{CBO} کل به صورت زیر خواهد شد.

$$I_{CBO} = I_{CBO_۱} + I_{CBO_۲} = (۱ + \frac{۱}{\beta}) I_{CBO}$$

از روابط (۵-۵۰) و (۵ - ۵۴) استفاده می‌کنیم.

$$S_V = \frac{-\beta^۲}{(۱+\beta^۲)R_E + R_B} = \frac{-(۲۰)^۲}{(۱+(۲۰^۲)\times ۰/۱ + ۱۰} = -۷/۹۸$$

$$S_I = \frac{(۱+\beta^۲)(R_B + R_E)}{(۱+\beta^۲)R_E + R_B} = \frac{(۱+(۲۰)^۲)(۱۰ + ۰/۱)}{(۱+(۲۰)^۲ \times ۰/۱ + ۱۰} = ۸۰/۸۴$$

علت این رابطه در صفحه ۱۷۶ کتاب ذکر شده است.

$$\Delta V_{BE} = ۲ \times (-۲/۵ \times \Delta T)\,mv = -۰/۳۷۵\ V$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO} \times ۲^{\frac{\Delta T}{۱۰}} = ۱/۵ \times ۰/۱ \mu A \times ۱۰^{-۳} \times ۲^{۷/۵} = ۰/۰۲۷ mA$$

$$\to \Delta I_C = S_V \Delta V + S_I \Delta I = ۷/۹۸ \times ۰/۳۷۵ + ۸۰/۸۴ \times ۰/۰۲۷ = ۵/۱ mA$$

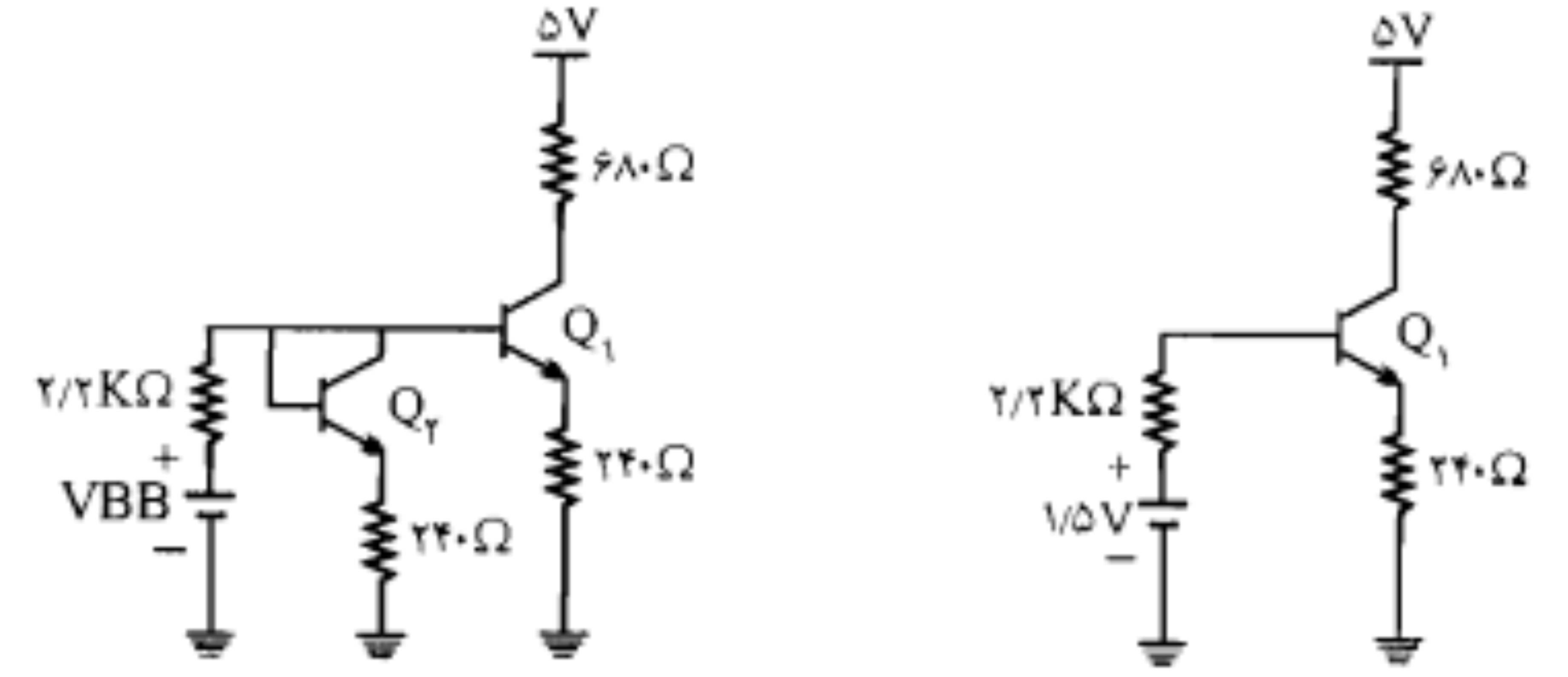
$$\Delta V_C = V_{C_۲} - V_{C_۱} = (V_{CC} - R_C I_{C_۲}) - (V_{CC} - R_C I_{C_۱}) = -R_C (I_{C_۲} - I_{C_۱})$$

$$= -R_C \times \Delta I_C = -۱K\Omega \times ۵/۱ = -۵/۱V$$

۲۰ ـ مدارهای شکل م ـ ۲۰ در دمای ۲۵^oC تا ۹۰^oC کار می‌کنند. در مدار شکل م ـ ۲۰ ب ترانزیستور $Q_۲$ به منظور جبران تغییرات حرارتی V_{BE} قرار داده شده است. با فرض $\beta = ۲۰۰$ و $I_{CBO} = ۰$

الف) تغییرات جریان نقطه‌کار را برای هر دو مدار به دست آورید.

ب) برای مدار شکل (ب)، V_{BB} را محاسبه کنید.



(ب)با مدار جبران کننده　　(الف)بدون مدار جبران کننده

شکل م_ ۲۰

☑ **راه حل:**

الف) بدون مدار جبران کننده:

$$R_B \ll \beta R_E \to S_V = \frac{-۱}{R_E} = \frac{-۱}{۰/۲۴} = -۴/۱۶$$

$$\Delta V_{BE} = -۲/۵ \times \Delta T = -۲/۵mV \times ۶۵ = -۱۶۲/۵mV = -۱/۶۲۵V$$

$$\Delta I_C = \Delta V_{BE} \times S_V = ۴/۱۶ \times ۱/۶۲۵ = ۶/۷mA$$

چون I_{CBO} صفر می‌باشد پس $S_I \times \Delta I_{CBO}$ صفر می‌شود و β نیز ثابت و برابر ۲۰۰ است پس $\Delta\beta$ صفر می‌باشد و $S_\beta \Delta\beta$ نیز صفر می‌باشد یعنی در رابطه (۵ ـ ۷۱) کتاب ΔI_C فقط برابر $\Delta V_{BE} \times S_V$ می‌شود.

با مدار جبران کننده:

$$R_{th} = ۰/۲۴ \parallel ۲/۲ = ۰/۲۲K\Omega$$

$$R_{th} = ۰/۲۴ \parallel ۲/۲ = ۰/۲۲K\Omega$$

$$V_{th} = \frac{V_B \times ۰/۲۴ + V_{BE} \times ۲/۲}{۰/۲۴ \times ۲/۲} \quad , \quad I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}} = \frac{\frac{۰/۲۴ V_{BB} + ۲/۲ V_{BE}}{۲/۴۴} - V_{BE}}{۰/۲۴ + \frac{۰/۲۲}{۲۰۰}}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \left(\frac{\frac{۲/۲}{۲/۴۴} - ۱}{۰/۲۴}\right) \to S_V = \frac{\partial I_C}{\partial V} = -۰/۴۰۹$$

$$\Delta V = -۲/۵mv \times ۶۵ = -۱/۶۲۵V \to \Delta I_C = -۰/۴۰۹ \times (-۱/۶۵۲) = ۰/۶۶۵\ mA$$

ب) برای مدار بدون جبران کننده:

$$I_{CQ} = \frac{۱/۵ - ۰/۷}{۰/۲۴ + \frac{۲/۲}{۲۰۰}} = ۳/۱۸mA$$

برای مدار با جبران کننده:

$$I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + ۰/۲۴} = \frac{\frac{۰/۲۴ V_{BB} + ۲/۲ \times ۰/۷}{۲.۴۴}}{۰/۲۴۱۱} = ۳/۱۸$$

$$\to V_{BB} = ۲/۲۷V$$

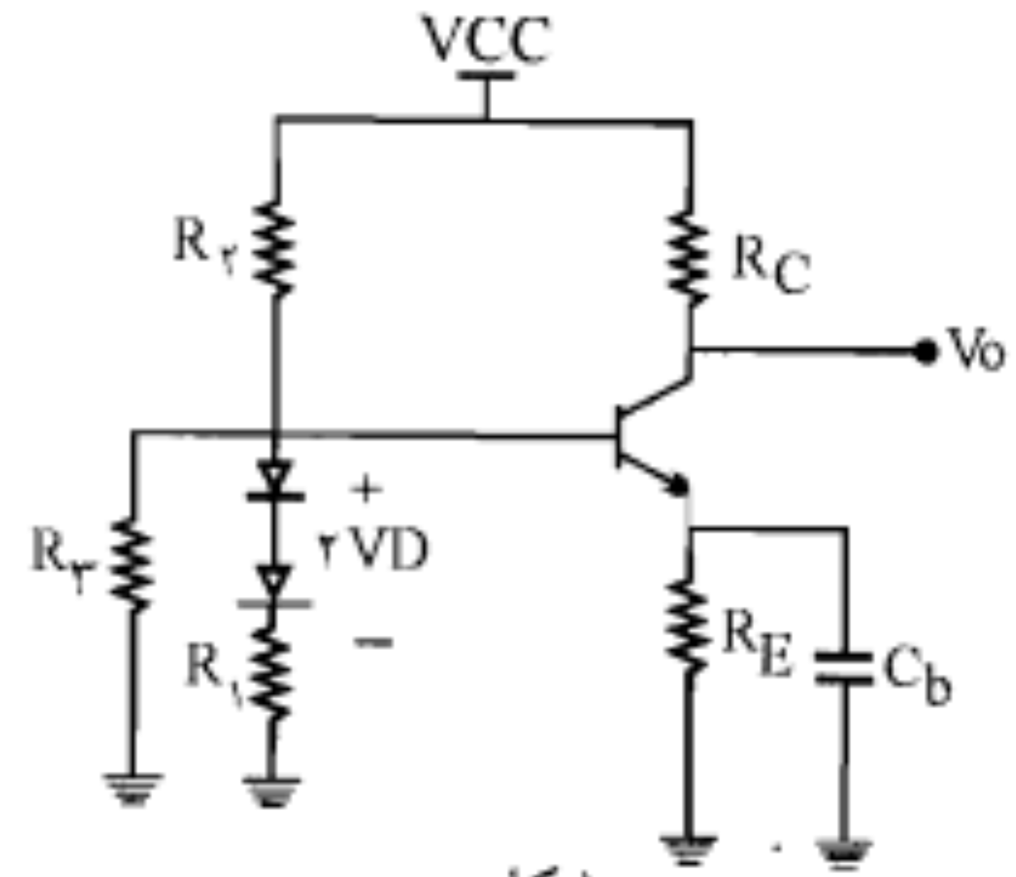
۲۱ ـ مدار شکل م ـ ۲۱ را در نظر بگیرید.

الف) چه رابطه‌ای بین مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ و $R_۳$ برقرار باشد تا تغییرات V_{BE} در اثر تغییر دما به طور کامل جبران شود.

ب) اگر $R_C = ۱K\Omega$ و $R_E = ۱۰۰\ \Omega$ و $V_{CC} = ۱۰\ V$ و $V_D = V_{BE} = ۰/۷V$ و $\beta = ۲۰۰$

www.PnuEB.com

باشد، مقادیر $R_۱$ و $R_۲$ و $R_۳$ را چنان تعیین کنید که دامنه نوسان در خروجی حداکثر شود.



شکل م_ ۲۱

☑ راه حل:

الف) مدار معادل تونن ورودی را می‌نویسیم:

$$V_{th}=V_{CC}\times\frac{(R_۱\parallel R_۳)}{(R_۱\parallel R_۳)+R_۲}+۲V_D\times\frac{(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)} \quad و \quad R_{th}=R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳$$

از طرفی: $\frac{\partial V_D}{\partial T}=\frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$

$$I_C=\frac{V_{th}-V_{BE}}{R_E+\frac{R_{th}}{\beta}}=\frac{\left[\frac{V_{CC}\times(R_۱\parallel R_۳)}{(R_۱\parallel R_۳)+R_۲}+\frac{۲V_D\times(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)}\right]-V_{BE}}{R_E+\frac{(R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳)}{\beta}}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T}=\frac{\frac{\partial V_D}{\partial T}\times\left[\frac{۲(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۱\parallel R_۳)}\right]-۱}{R_E+\frac{(R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳)}{\beta}}$$

$$\rightarrow\frac{\partial I_C}{\partial V_D}=\frac{\left[\frac{۲(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)}-۱\right]}{(R_E+\frac{(R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳)}{\beta})}=۰$$

برای اینکه رابطه بالا صفر شود باید صورت کسر صفر شود.

$$\rightarrow\frac{۲(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)}-۱=۰\rightarrow ۲(R_۲\parallel R_۳)=R_۱+(R_۲\parallel R_۳)\rightarrow R_۱=R_۲\parallel R_۳$$

ب) تحلیل ac:

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}}{R_{ac}+R_{DC}}=\frac{۱۰V}{(R_C)+(R_C+R_E)}=\frac{۱۰V}{۱+(۱+۰/۱)}=۴/۷۶\,mA$$

$$V_{th}=\frac{V_{CC}\times(R_۱\parallel R_۳)}{(R_۱\parallel R_۳)+R_۲}+\frac{۲V_D\times(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)} \qquad R_{th}=R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳$$

$$KVL: I_{CQ}=\frac{V_{th}-V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta}+R_E}=\frac{\left[\frac{۱۰\times(R_۱\parallel R_۳)}{(R_۱\parallel R_۳)+R_۲}+\frac{۲\times۰/۷(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)}\right]-۰/۷}{\frac{R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳}{۲۰۰}+۰/۱}=۴/۷۶\,mA$$

از طرفی در قسمت الف به دست آوریم: $R_۱=R_۲\parallel R_۳$ (I)

و داریم: $R_{th}=\frac{\beta R_E}{۱۰}=\frac{۲۰۰\times۰/۱}{۱۰}=۲K\Omega=R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳$ (II)

$$I_{CQ}=\frac{۱۰(R_۱\parallel R_۳)}{R_۲+(R_۱\parallel R_۳)}+\frac{۱/۴(R_۲\parallel R_۳)}{R_۱+(R_۲\parallel R_۳)}=(\frac{۲}{۲۰۰}+۰/۱)\times۴/۷۶+۰/۷=۱/۲۲ \quad (III)$$

با توجه به رابطه زیر داریم:

$$R_{th}=۲K\Omega=R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳=R_۲\times\frac{(R_۱\parallel R_۳)}{R_۲+(R_۱\parallel R_۳)}$$

$$(III): ۱۰\times\frac{R_{th}}{R_۲}+\frac{۱/۴\times R_۱}{R_۱+R_۱}=۱/۲۲\rightarrow ۱۰\times\frac{۲K\Omega}{R_۲}+\frac{۱/۴}{۲}=۱/۲۲$$

$$\rightarrow R_۲=۳۸/۴\,K\Omega$$

برای به دست آوردن $R_۱$ و $R_۳$:

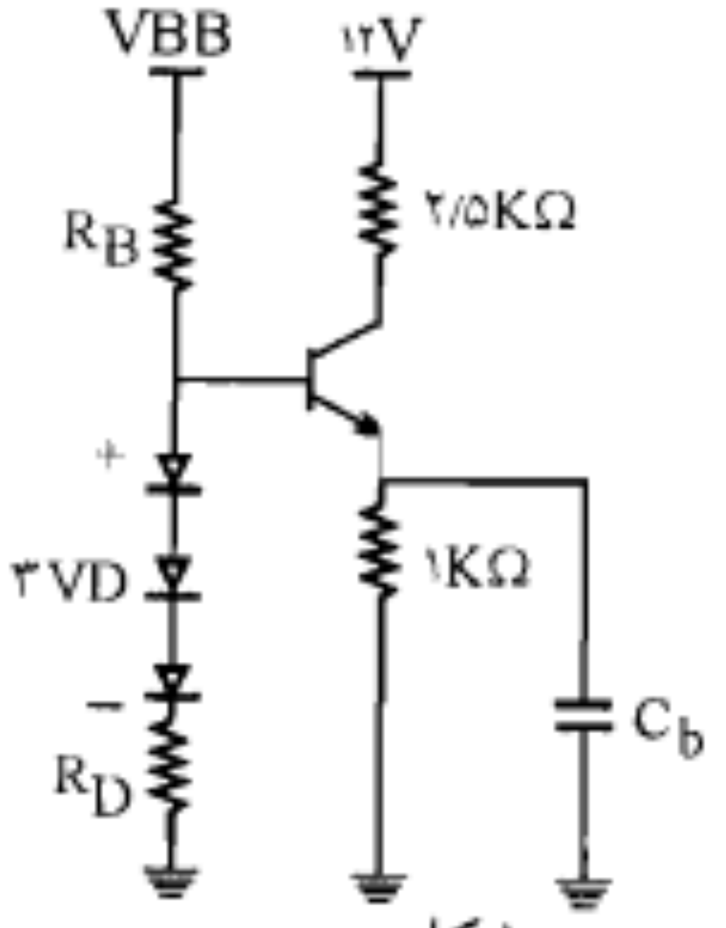
$$\begin{cases}R_۱=R_۲\parallel R_۳\\ R_{th}=R_۱\parallel R_۲\parallel R_۳=۲K\Omega\rightarrow R_۱\parallel R_۱=۲K\Omega\rightarrow R_۱=۴K\Omega\end{cases}$$

$$\rightarrow R_۱=R_۲\parallel R_۳\rightarrow R_۱=\frac{R_۲R_۳}{R_۲+R_۳}\rightarrow$$

$$۴=\frac{۳۸/۴R_۳}{۳۸/۴+R_۳}\rightarrow ۴R_۳+۱۵۳/۶=۳۸/۴R_۳\rightarrow R_۳=۴/۴۶\,K\Omega$$

www.*PnuEB*.com

۲۲ ـ در مدار شکل م ـ ۲۲، با فرض $V_{BE}=V_D=0/7V$ و $100<\beta<200$



شکل م ـ ۲۲

الف) تحت چه شرایطی مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و اثرات حرارتی کاملاً جبران می‌شود (اثبات کنید).

ب) مقادیر R_B و R_D و V_{BB} را طوری تعیین کنید که ضمن محقق شدن شرایط بند (الف)، نقطه کار ترانزیستور در وسط خط بار ac آن قرار گیرد.

☑ **راه حل:**

الف) برای اینکه مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$R_{th}=\frac{\beta_{min}R_E}{10}=\frac{100\times 1}{10}=10K\Omega \quad (I)$$

از طرفی مدار معادل تونن به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{cases} R_{th}=R_B \parallel R_D \\ V_{th}=\dfrac{3V_D\times R_B}{R_B+R_D}+\dfrac{V_{BB}\times R_D}{R_B+R_D} \end{cases}$$

از طرفی $I_C=\dfrac{V_{th}-V_{BE}}{\dfrac{R_{th}}{\beta_{av}}+R_E}=\dfrac{\dfrac{3V_D\times R_B+R_D\times V_{BB}}{R_B+R_D}-V_{BE}}{\dfrac{R_B\parallel R_D}{\beta_{av}}+R_E}$

$\dfrac{\partial I_C}{\partial T}=\dfrac{\partial V_D}{\partial T}\left(\dfrac{3R_B}{R_B+R_D}\right)-\dfrac{\partial V_{BE}}{\partial T}$ از طرفی $\dfrac{\partial V_D}{\partial T}=\dfrac{\partial V_{BE}}{\partial T}$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T}=0\rightarrow\frac{3R_B}{R_B+R_D}-10=0\rightarrow 2R_B=R_D$$

ب) برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار باشد:

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}}{R_{ac}+R_{DC}}=\frac{12}{R_C+(R_C+R_E)}=\frac{12}{2/5+(2/5+1)}=2mA$$

در بند الف به دست آوردیم:

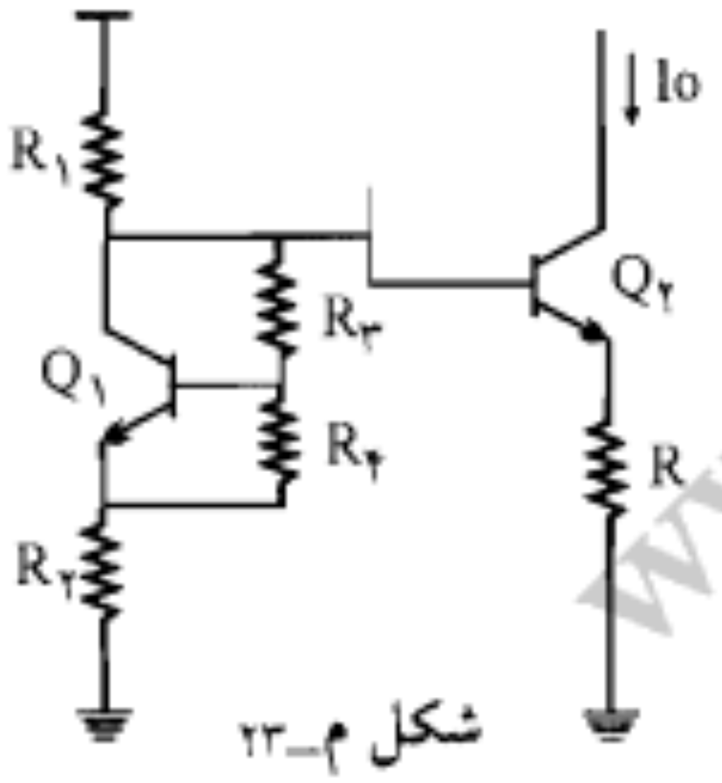
$$R_D=2R_B \quad , \quad R_{th}=R_B\parallel R_D=\frac{R_B\times R_D}{R_B+R_D}=\frac{R_B\times 2R_B}{R_B+2R_B}=10K\Omega$$

$$\rightarrow\frac{2R_B^2}{3R_B}=10K\Omega\rightarrow R_B=15K\Omega$$

$$R_D=2R_B=30K\Omega$$

از طرفی: $I_C=2=\dfrac{\dfrac{3\times 0/7\times 115+30\times V_{BB}}{30+15}-0/7}{\dfrac{30\parallel 15}{150}+1}\rightarrow V_{BB}=3/2V$

۲۳ ـ در مدار شکل م ـ ۲۳، ترانزیستور مشابه و دارای β بسیار بزرگ هستند. به منظور افزایش سهم مقاومت بار از منبع تغذیه، R_2 را تا حد نصف R_1 کاهش می‌دهیم. مقاومت‌های R_3 و R_4 را طوری محاسبه نمایید که وابستگی I_o به تغییرات $V_{BE}=V_{BE_1}=V_{BE_2}$ حداقل شود و ترتیبی دهید که جریان R_4، $0/1$ جریان‌های ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 باشد و $I_o=10mA$ شود.



شکل م ـ ۲۳

☑ **راه حل:**

طبق فرض مسئله $R_2=\dfrac{R_1}{2}$

$$I_{R_4}=\frac{V_{BE}}{R_4}=0/1I_o=0/1\times 10=1mA$$

$$\rightarrow\frac{0/7}{R_4}=1mA\rightarrow R_4=700\Omega$$

$$KVL: R_1IR_1+R_3IR_3+V_{BE_1}+R_2IR_2+R_4I_4=10$$

$$\rightarrow 10=R_1(I_o+0/1I_o)+R_3\times 0/1I_o+0/7+0/7\times 0/1I_o$$

$$+\frac{R_1}{2}R_1(I_o+0/1I_o)$$

$$\rightarrow\frac{3}{2}R_1\times 1/1I_o=10-0/7-0/07I_o-0/1R_3I_o \qquad (I)$$

$$KVL: R_1IR_1+RI_o=10-V_{BE}\rightarrow$$

$$R_1(I_o+0/1I_o)+RI_o=10-0/7 \qquad (II)$$

$$(II)\rightarrow R_1(1/1)I_o=10-0/7-RI_o \qquad (III)$$

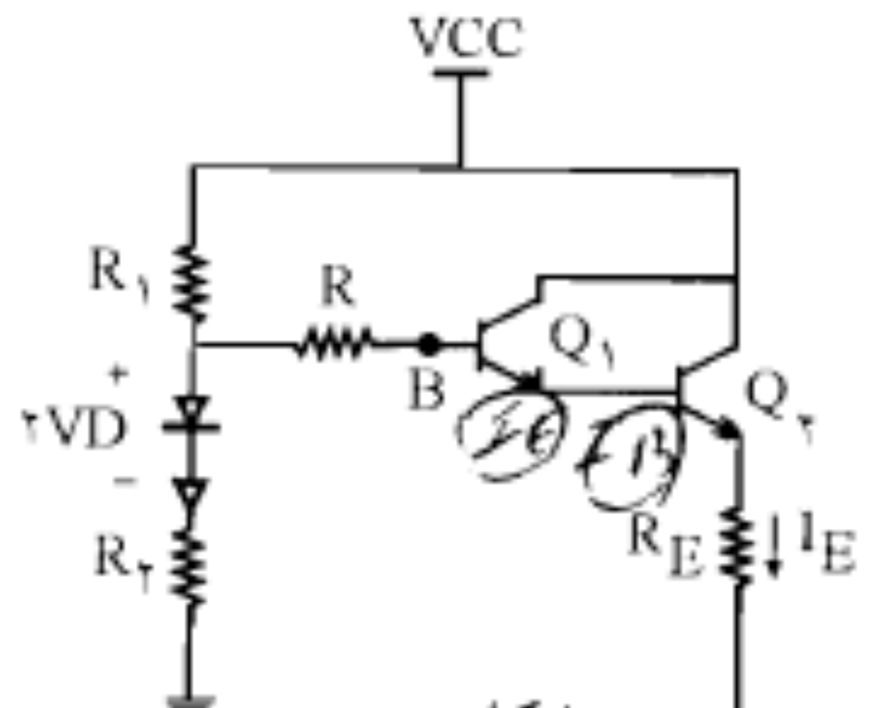
www.PnuEB.com

$$(I), (III) \Rightarrow \frac{۳}{۲} \times [\,۱۰ - ۰/۷ - RI_۰\,] = ۱۰ - ۰/۷ - ۰/۰۷I_۰ - ۰/۱R_۳I_۰$$

$$I_۰ = ۱۰mA \rightarrow \frac{۳}{۲} \times (۹/۳ - R \times ۱۰) = ۹/۳ - ۰/۰۷ \times ۱۰ - ۰/۱ \times ۱۰ \times R_۳$$

$$\rightarrow ۱۳/۹۵ - ۱۵R = ۹/۳ - ۰/۷ - R_۳ \rightarrow R_۳ = ۵/۳۵ - ۱۵R$$

۲۴ ـ در مدار دارلینگتون شکل م ـ ۲۴، β معادل برای زوج ترانزیستورها را ۲۵۰۰ در نظر بگیرید.



شکل م–۲۴

الف) معادل تونن مدار بایاس بیس از دید نقطه β را به‌دست آورید.

ب) در مدار حاصل جریان I_E را به دست آورید.

ج) آیا می‌توان مقادیر مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ را طوری تعیین نمود که تغییرات حرارتی نقطه کار کاملاً جبران شود؟ (از تغییرات I_{CBO} و β صرفنظر می‌شود) در صورتی که جواب منفی است، در مدار جبران کننده اصلاح لازم را به عمل آورده و شرایط لازم را برای پایداری I_E بیان کنید.

د) در مدار اصلاح با فرض $R = ۲۰۰\,K\Omega$ و $R_E = ۱K\Omega$، مقادیر $R_۱$ و $R_۲$ را طوری تعیین کنید که مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β نیز برخوردار باشد.

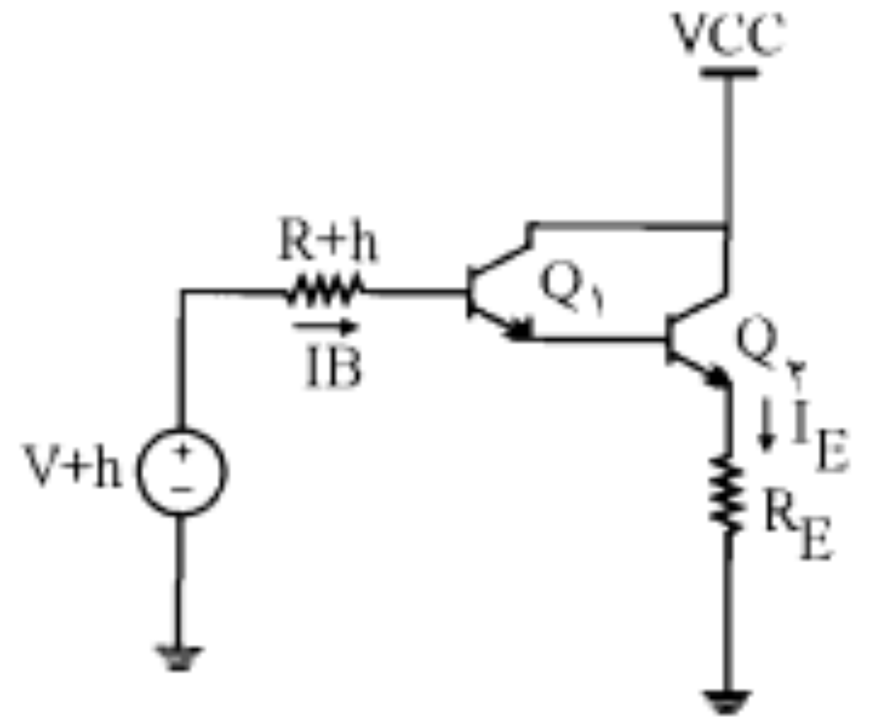
☑ **راه حل:**

الف)

$$\begin{cases} V_{th} = \dfrac{V_{CC} \times R_۲}{R_۱ + R_۲} + \dfrac{۲V_D R_۱}{R_۱ + R_۲} = \dfrac{V_{CC} R_۲ + ۲V_D R_۱}{R_۱ + R_۲} \\ R_{th} = (R_۱ \parallel R_۲) + R = \dfrac{R_۱ R_۲}{R_۱ + R_۲} + R \end{cases}$$

پس از اجرای مدار معادل تونن، مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:

ب) برای محاسبه I_E، KVL می‌زنیم:



$$KVL: R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - ۲V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th} \times \frac{I_E}{۱+\beta} + R_E I_E = V_{th} - ۲V_{BE}$$

β معادل برای زوج ترانزیستورها طبق فرض مسأله ۲۵۰۰ می‌باشد و در $(\beta + ۱)$ از عدد یک در برابر ۲۵۰۰ صرفنظر می‌کنیم.

$$\Rightarrow I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = V_{th} - ۲V_{BE}$$

ج) در قسمت ب I_E را به دست آوریم:

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = V_{th} - ۲V_{BE}$$

به جای V_{th} مقادیر آنها را جایگزین می‌کنیم:

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = ۲V_D \times \frac{R_۱}{R_۱ + R_۲} + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} - ۲V_{BE} \quad (I)$$

$V_D = V_{BE}$ در نظر می‌گیریم:

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = ۲V_{BE} (\frac{-R_۲}{R_۱ + R_۲}) + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲}$$

چون ضریب V_{BE} نمی‌تواند صفر گردد پس تغییرات I_E در رابطه با تغییرات درجه حرارت جبران نمی‌شود و اگر بخواهیم جبران شود باید یک دیود دیگر به مدار اضافه نمائیم در این صورت در رابطه V_{th} به جای $۲V_D$، $۳V_D$ جایگزین می‌شود در این صورت رابطه (I) به صورت زیر در می‌آید.

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = ۲V_D \times \frac{R_۱}{R_۱ + R_۲} + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} - ۲V_{BE} \quad (I)$$

$V_D = V_{BE}$ در نظر می‌گیریم:

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = ۲V_{BE} (\frac{-R_۲}{R_۱ + R_۲}) + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲}$$

چون ضریب V_{BE} نمی‌تواند صفر گردد پس تغییرات I_E در رابطه با تغییرات درجه حرارت جبران نمی‌شود و اگر بخواهیم جبران شود باید یک دیود دیگر به مدار اضافه نمائیم در این صورت در رابطه V_{th} به جای $۲V_D$، $۳V_D$ جایگزین می‌شود در این صورت رابطه (I) به صورت زیر در می‌آید.

$$I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = ۳V_D \times \frac{R_۱}{R_۱ + R_۲} + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} - ۲V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = V_{BE} (\frac{۳R_۱ - ۲R_۱ - ۲R_۲}{R_۱ + R_۲}) + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲}$$

$$\Rightarrow I_E (\frac{R_{th}}{\beta} + R_E) = V_{BE} (\frac{R_۱ - ۲R_۲}{R_۱ + R_۲}) + V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲}$$

حال برای جبران کامل تغییرات درجه حرارت ضریب V_{BE} باید صفر شود یعنی:

$$\frac{R_۱ - ۲R_۲}{R_۱ + R_۲} = ۰ \rightarrow R_۱ - ۲R_۲ = ۰ \rightarrow R_۱ = ۲R_۲$$

د) برای اینکه مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردارباشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} = ۰/۱R_E \Rightarrow R_{th} = ۰/۱R_E \times \beta = ۰/۱R_E \times \beta = ۰/۱ \times ۱ \times ۲۵۰۰ = ۲۵۰\,K\Omega$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow R + \frac{R_۱ R_۲}{R_۱ + R_۲} = ۲۵۰ \qquad \text{از طرفی} \begin{cases} R_۱ = ۲R_۲ \\ R = ۲۰۰ K\Omega \end{cases}$$

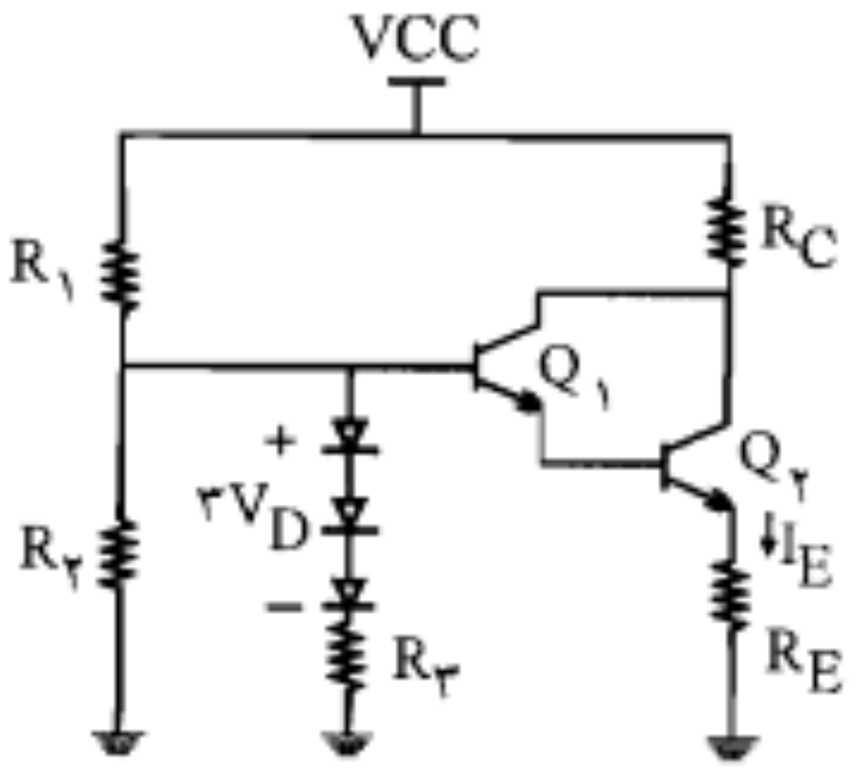
$$\Rightarrow ۲۰۰ + \frac{۲R_۲^۲}{۳R_۲} = ۲۵۰ \Rightarrow \frac{۲}{۳} R_۲ = ۵۰ \Rightarrow R_۲ = ۷۵ K\Omega$$

$$\Rightarrow R_۱ = ۲ \times ۷۵ K\Omega = ۱۵۰ K\Omega$$

۲۵ـ در مدار شکل م ـ ۲۵، با فرض $I_{CBO} = ۰$

الف) I_E را بر حسب سایر مقادیر مدار به دست می‌آید.

ب) با فرض تشابه کامل تغییرات حرارتی ولتاژ پیوند ترانزیستورها و دیودها، شرط لازم برای صفر شدن $\frac{\Delta I_E}{\Delta_T}$ را تعیین کنید.



شکل م ـ ۲۵

☑ راه حل:

الف)

$$I_E = (۱+\beta)^۲ I_B = (۱+\beta)^۲ \frac{V_{th} - ۲V_{BE}}{R_{th} + (۱+\beta)^۲ R_E}$$

$$\begin{cases} R_{th} = (R_۱ \| R_۲ \| R_۳) \\ V_{th} = \dfrac{V_{CC} \times (R_۲ \| R_۳)}{R_۱ + (R_۲ \| R_۳)} + ۳V_D \times \dfrac{(R_۱ \| R_۲)}{(R_۱ \| R_۲) + R_۳} \end{cases}$$

مقادیر به دست آمده برای R_{th} و V_{th} را در رابطه I_E قرار می‌دهیم.

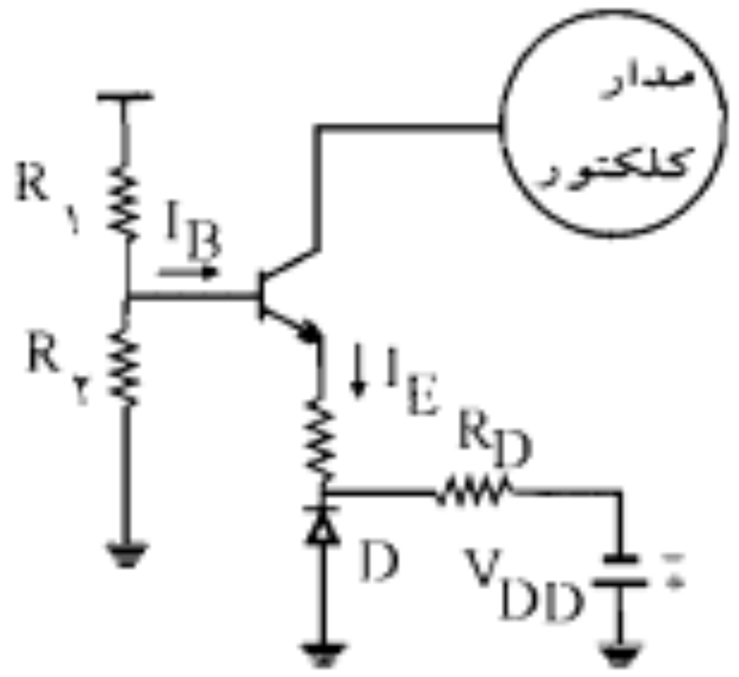
$$\Rightarrow I_E = (۱+\beta)^۲ = \frac{\dfrac{V_{CC} \times (R_۲ \| R_۳)}{R_۱ + (R_۲ \| R_۳)} + ۳V_D \times (\dfrac{R_۱ \| R_۲}{(R_۱ \| R_۲) + R_۳})}{(R_۱ \| R_۲ \| R_۳) + (۱+\beta)^۲ \times R_E}$$

ب)

$$\frac{\partial I_E}{\partial_T} = (۱+\beta)^۲ \frac{\dfrac{\partial V_D}{\partial_T} \times \dfrac{۳(R_۱ \| R_۲)}{(R_۱ \| R_۲) + R_۳} - ۲\dfrac{\partial V_{BE}}{\partial_T}}{R_{th} + (۱+\beta^۲) R_E} = ۰$$

$$\rightarrow \frac{۳(R_۱ \| R_۲)}{(R_۱ \| R_۲) + R_۳} - ۲ = ۰ \rightarrow (R_۱ \| R_۲) = ۲R_۳$$

۲۶ ـ در مدار شکل ۵ ـ ۳۵، نشان دهید که با شرط $\frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$ تغییرات حرارتی I_E برابر صفر خواهد بود.



☑ راه حل:

مدار معادل تونن در بیس را می‌نویسیم:

$$\begin{cases} R_{th} = R_۱ \| R_۲ = \dfrac{R_۱ R_۲}{R_۱ + R_۲} \\ V_{th} = V_{CC} \times \dfrac{R_۲}{R_۱ + R_۲} \end{cases}$$

در حلقه R_{th} و V_{th} و R_E و V_D و V_{BE} یک KVL می‌نویسیم:

$$KVL: R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$R_{th} \times \frac{I_E}{۱+\beta} + R_E I_E = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$I_E (\frac{R_{th}}{۱+\beta} + R_E) = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T} (\frac{R_{th}}{۱+\beta} + R_E) = \frac{\Delta V_{th}}{\Delta T} + \frac{\Delta V_D}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$$

چون V_{th} عدد ثابتی است پس $\frac{\Delta V_{th}}{\Delta T}$ برابر صفر خواهد بود و طبق فرض مسئله $\frac{\Delta V_D}{\Delta T} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$ می‌باشد پس:

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta T} (\frac{R_{th}}{۱+\beta} + R_E) = ۰ \Rightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T} = ۰$$

چون $(\frac{R_{th}}{۱+\beta} + R_E)$ نمی‌تواند صفر شود پس باید $\frac{\Delta I_E}{\Delta T}$ برابر صفر گردد یعنی تغییرات حرارتی I_E برابر صفر خواهد بود.

www.PnuEB.*.com

فصل ۶ تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری در فرکانس‌های پایین

۱ ـ مشخصات ترانزیستورهای فرکانس بالا غالباً بر حسب پارامتری y داده می‌شود. این پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$i_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$
$$i_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

الف) یک مدار معادل شبیه ۶ ـ ۳ با استفاده از پارامترهای y ترسیم نمائید؟

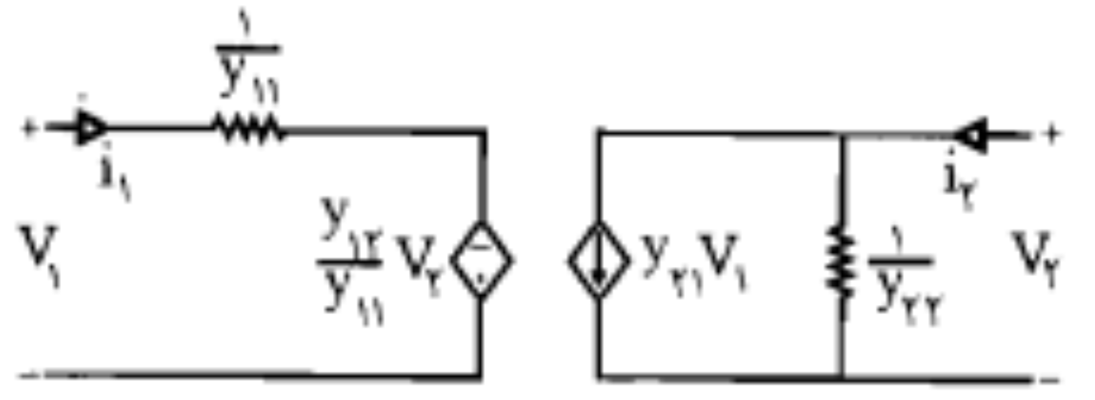
ب) برای هر یک از پارامترهای y یک تعریف مشخص ارائه نمایند؟

☑ **راه حل:**

الف) اگر معادله فوق به صورت زیر مرتب شود می‌توان یک مدار معادل شبیه معادل هیبرید به دست آورد.

$$V_1 = \frac{1}{y_{11}} i_1 - \frac{y_{12}}{y_{11}} V_2 \quad , \quad i_2 = y_{21}V_1 + y_{22}v_2 \qquad (1)$$

مدار معادل رابطه (۱) می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود.



(ب)

(۱) ادمیتانس ورودی وقتی که خروجی اتصال کوتاه است ⟵ $y_{11} = \frac{i_1}{V_1}\Big|_{V_2=0}$

(۲) ادمیتانس انتقالی وقتی خروجی اتصال کوتاه شود ⟵ $y_{21} = \frac{i_2}{V_1}\Big|_{V_2=0}$

(۳) ادمیتانس انتقالی وقتی ورودی اتصال کوتاه است ⟵ $y_{12} = \frac{i_1}{V_2}\Big|_{V_1=0}$

(۴) ادمیتانس خروجی وقتی ورودی اتصال کوتاه است ⟵ $y_{22} = \frac{i_2}{V_2}\Big|_{V_1=0}$

۲ ـ پارامترهای تقویت‌کننده بیس مشترک را بر حسب پارامترهای h_{re}، h_{oe}، h_{ie} و h_{fe} به‌دست آورید؟

☑ **راه حل:** معادلات مدار معادل ترانزیستور با پارامترهای هیبرید در فرم امیتر مشترک چنین است که:

$$V_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}V_{ce} \ (1) \quad , \quad i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \quad (2)$$

اگر در معادله (۲) به جای $i_b = i_e - i_c$ و $V_{ce} = V_{cb} - V_{eb}$ قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$i_c = h_{fe}(-i_e - i_c) + h_{oe}(V_{cb} - V_{eb})$$

$$\Rightarrow i_c = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}} i_e + h_{oe}\frac{V_{cb}}{1+h_{fe}} + \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{be} \qquad (3)$$

معادله (۱) نیز با جایگذاری فوق به صورت زیر خواهد شد:

$$V_{be} = h_{ie}(-i_e - i_c) + h_{re}(V_{cb} - V_{eb}) \qquad (4)$$

اگر i_c را از معادله (۳) در معادله (۴) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$V_{be} = -h_{ie}i_e + \frac{h_{ie}h_{fe}}{1+h_{fe}} i_e - \frac{h_{ie}h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{cb} - \frac{h_{ie}h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{be} + h_{re}V_{cb} + h_{re}V_{be} \quad (5)$$

از معادله (۵) می‌توان V_{be} را به صورت زیر نوشت:

$$V_{be} = \frac{-h_{ie}}{(1-h_{re})+(1+h_{fe})+h_{ie}h_{oe}} i_e + \frac{h_{re}(1+h_{fe}) - h_{ie}h_{oe}}{(1-h_{re})(1+h_{fe})+h_{ie}h_{oe}} V_{eb}$$

$$V_{eb} = -V_{be} = \frac{h_{ie}}{(1-h_{re})(1+h_{fe})+h_{ie}h_{oe}} i_e + \frac{h_{ie}h_{oe} - h_{re}(1+h_{fe})}{(1-h_{re})(1+h_{fe})+h_{ie}h_{oe}} V_{eb}$$

www.*PnuEB.com

ضرایب هیبرید در مدل بیس مشترک عبارتست از: $V_{eb} = h_{ib}\, i_e + h_{rb}\, V_{cb}$

$$h_{ie} = \frac{h_{ie}}{(1-h_{re})(1+h_{fe}) + h_{ie}h_{oe}} \quad , \quad h_{rb} = \frac{h_{ie}h_{oe} - h_{re}(1+h_{fe})}{(1-h_{re})(1+h_{fe}) + h_{ie}h_{oe}}$$

مطابق روش فوق، V_{be} را از معادله (۴) محاسبه می‌کنیم:

$$V_{be} = \frac{-h_{ie}}{1-h_{re}}\, i_e - \frac{h_{ie}}{1-h_{re}}\, i_c + \frac{h_{re}}{1-h_{re}}\, V_{cb} \qquad (6)$$

اگر V_{be}، معادله (۶) را در معادله (۳) قرار دهیم خواهیم داشت:

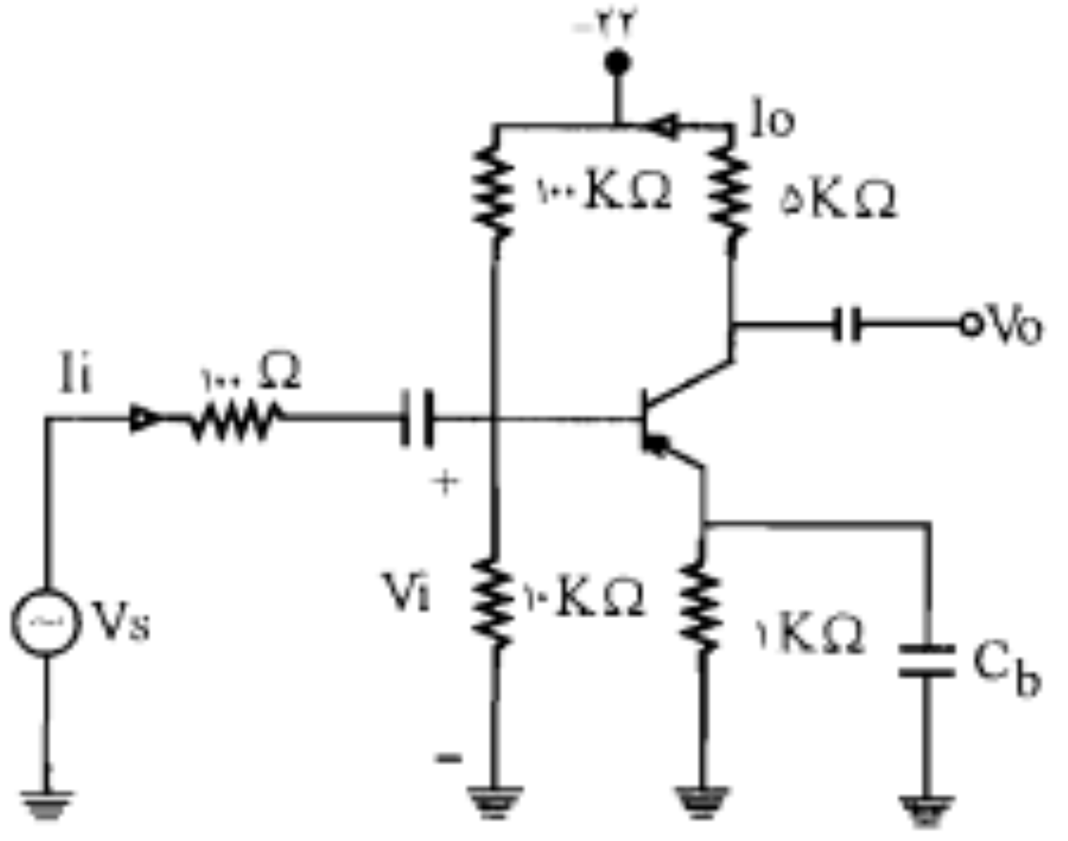
$$i_c = \frac{-h_{fe}(1-h_{re}) + h_{oe}h_{ie}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{oe}h_{ie}}\, i_e + \frac{h_{oe}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{oe}h_{ie}}\, V_{eb}$$

ضرایب هیبرید در مدل بیس مشترک عبارتست از: ⟵ $i_c = h_{pb}\, i_e + h_{ob}\, V_{cb}$

$$h_{fb} = \frac{-h_{fe}(1-h_{re}) + h_{oe}h_{ie}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{oe}h_{ie}} \simeq -1$$

$$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{oe} + h_{ie}} \simeq \frac{h_{oe}}{h_{fe} + h_{oe}h_{ie}}$$

۳- در تقویت‌کننده شکل زیر ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ است.

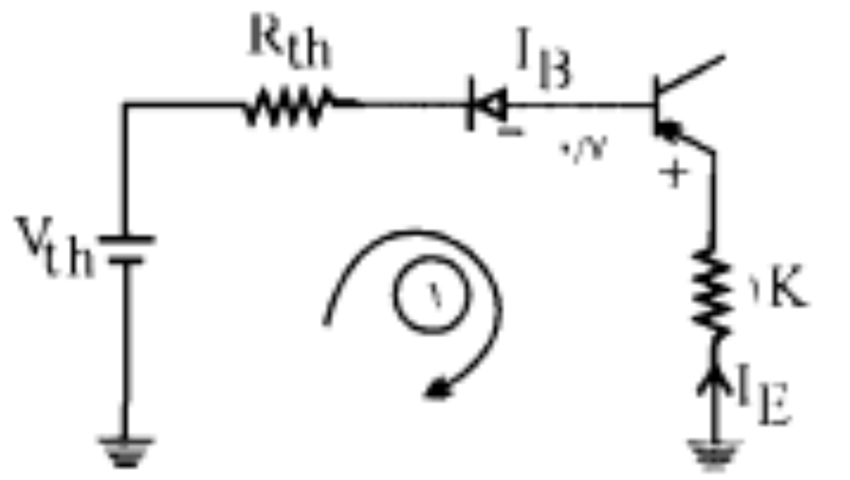


شکل م -۳

الف ـ کمیت‌های R_i، A_I و A_{VS} را محاسبه کنید؟

ب) اگر فقط نیمی از مقاومت امیتر را با خازن کنارگذر C_b بای پاس نمائیم. A_I و R_i و A_{VS} چقدر خواهد شد؟ این عمل چگونه به خطی‌تر شدن تقویت‌کننده سیگنال بزرگ کمک می‌کند؟

☑ **راه حل:** الف) برای محاسبه h_{ie}، ابتدا $I_{CQ} \simeq I_{EQ}$ را محاسبه می‌کنیم. با توجه به مدار، بایاس DC از نوع بایاس مقسم ولتاژ است. بنابراین خواهیم داشت:



$$V_{th} = \frac{-22 \times 10}{100 + 10} = -2V$$

$$R_{th} = 10K \,\|\, 100K = 9/09\ K\Omega$$

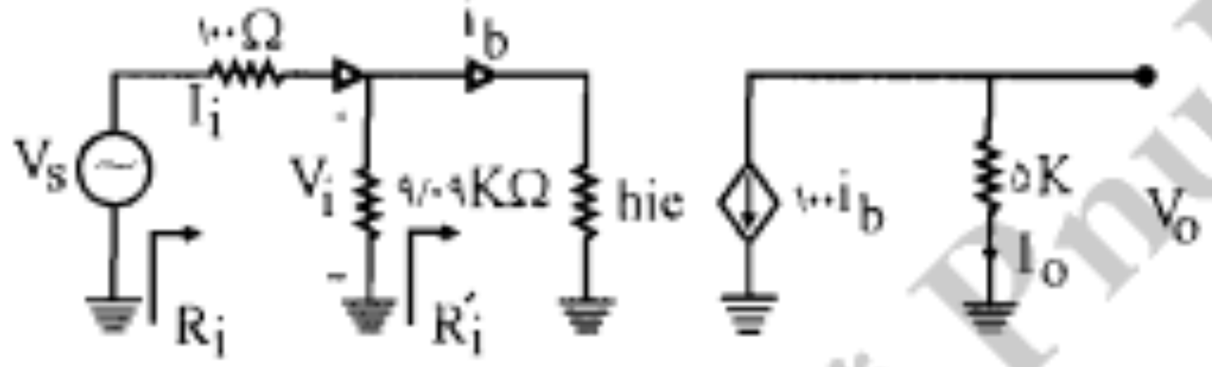
در حلقه ورودی (۱)، با اعمال KVL خواهیم داشت:

$$\frac{KVL}{(1)}: -V_{th} - 0/7 = R_{th} I_B + 1K \times I_E$$

$$\Rightarrow I_{EQ} = 1/19\ mH$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{EQ}} = \frac{100 \times 26}{1/19} = 2/18 K\Omega$$

حال مدار معادل ac به‌صورت زیر خواهد شد:



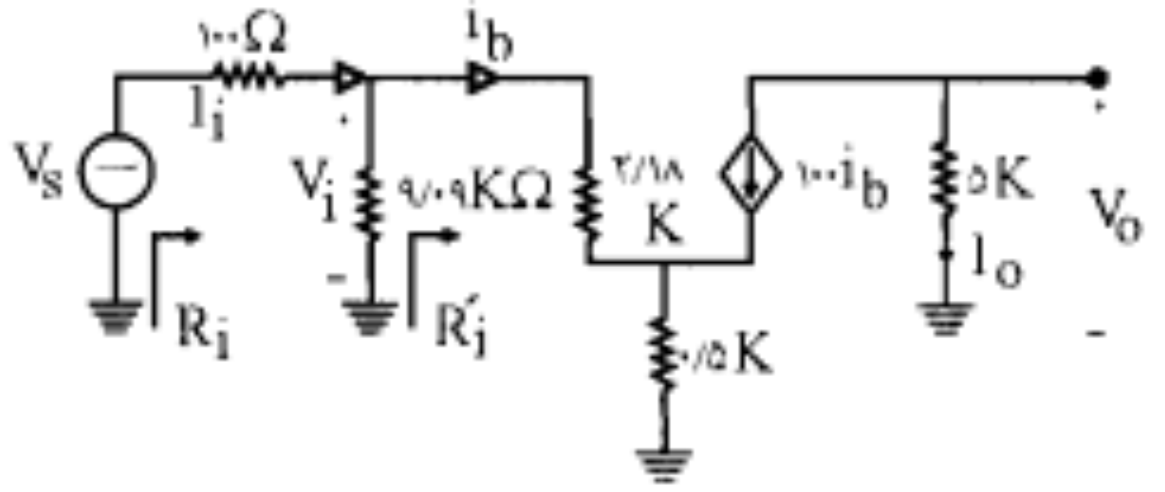
$$R'_i = h_{ie} = 2/18 K\Omega \Rightarrow R_i = 9/09\ K \,\|\, 2/18K \cong 1/78\ K\Omega$$

$$A'_I = \frac{I_O}{i_b} = -h_{fe} = -100 \quad , \quad A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{i_b} \cdot \frac{i_b}{I_i} = \frac{1}{1/25} \times A'_I = -\frac{100}{1/25} = -80$$

$$A'_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_L \cdot I_O}{R'_i \cdot I_b} = \frac{R_L}{R'_I} \times A'_I = -100 \times \frac{5}{2/18} = -229$$

$$A_{VS} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = A'_V \times \frac{V_s \times \frac{R_i}{R_i + 0/1}}{V_s} = -216/8$$

ب) اگر فقط نصف R_E توسط C_b بای‌پاس شود مدار معادل به‌صورت زیر خواهد شد:



$$R'_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_e = 2/18 + (101) \times 0/5 = 52/68\ K\Omega$$

www.PnuEB.com

$$A'_I = \frac{I_o}{i_b} = -۱۰۰ \quad , \quad A'_v = \frac{R_L}{R'_i} \times A'_I = -۹/۴۸$$

$$I_b = I_i \times \frac{۹/۰۹}{۹/۰۹ + R'_i} = ۰/۱۴۷ \times I_i$$

$$A_I = A'_I \times \frac{I_b}{I_i} = A'_I \times ۰/۱۴۷ \cong -۱۵$$

$$R_i = ۹/۰۹K \parallel R'_i = ۷/۷\ K\Omega$$

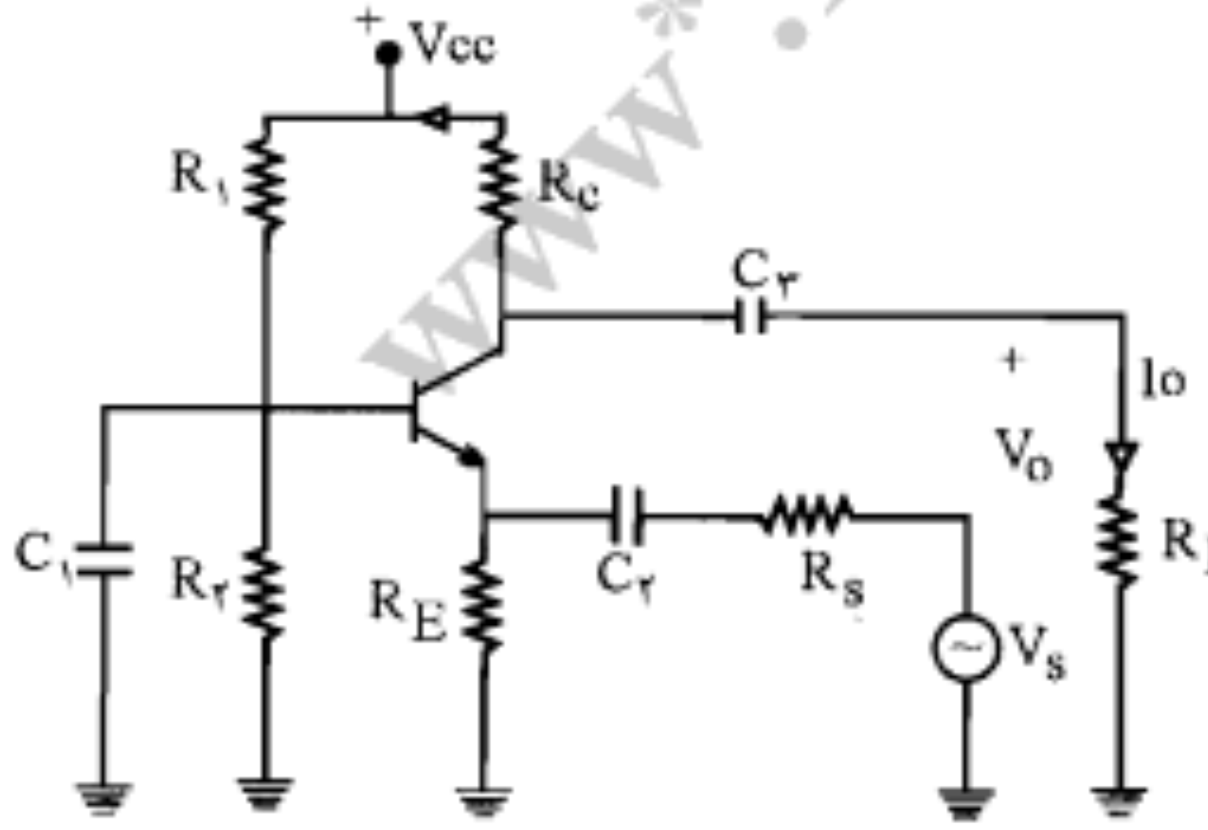
$$A_{vs} = A'_v \times \frac{R_i}{R_i + ۰/۱} = -۹/۴$$

در حالت امیتر، تقویت کاهش می‌یابد و سیگنال‌های با دامنه زیاد بریده نمی‌شوند و بدون برش و اعوجاج عبور خواهند کرد.

۴ـ یک تقویت‌کننده بیس مشترک با $R_i < ۲۰$ و $A_{V_o} > ۵۰$ ($A_{V_o} = \lim A_V$ وقتی که R_L به سمت بی‌نهایت میل می‌کند) طراحی کنید که در آن نوسان متقارن خروجی حداکثر بوده و پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشیم. ($۱۵۰ > \beta > ۱۰۰$) در صورتی که β فوق مناسب نباشد به دلخواه از یک β با میزان تغییرات مناسب استفاده کنید؟

☑ **راه حل:**

مدار کلی تقویت‌کننده بیس مشترک به‌صورت مقابل است.



مانند مسئله قبل چون بایاس DC از نوع مقسم ولتاژ است با اعمال KVL در حلقه ورودی خواهیم داشت:

$$V_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} \quad , \quad R_{th} = R_۱ \parallel R_۲$$

$$R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE}$$

اگر $I_E \simeq I_C$ خواهیم داشت:

$$\left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E\right) I_E = V_{th} - V_{BE}$$

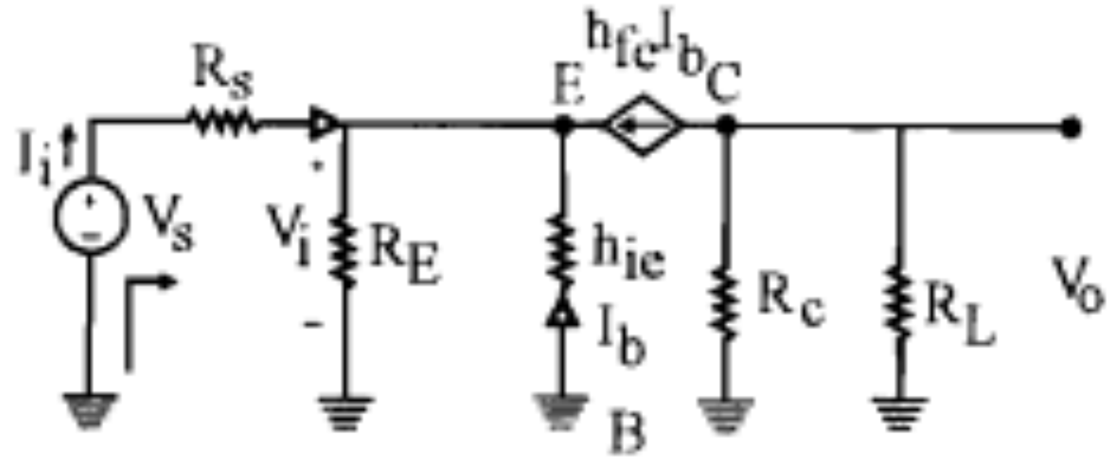
برای داشتن پایداری مناسب نسبت به β باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} \le ۰/۱ R_E \quad (۱)$$

با در نظر گرفتن حالت مساوی در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$R_{th} = ۰/۱ R_E \beta_{min} = ۱۰ R_E$$

مدار معادل سیگنال کوچک ac مطابق شکل زیر است.



$$V_i = -h_{ie} I_b \quad , \quad V_o = -h_{fe} i_b \times \frac{R_c \times R_L}{R_c + R_L} \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$$

$$A_{V_O} = A_v \Big|_{R_L \to \infty} = \frac{R_c \cdot h_{fe}}{h_{ie}} \Rightarrow \frac{R_c \times h_{fe}}{h_{ie}} > ۵۰ \quad (۲)$$

برای امپدانس ورودی به راحتی می‌توان نوشت ⟵ $R_i = \frac{h_{ie}}{۱ + h_{fe}} \simeq \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$

$$R_i = \frac{\frac{h_{fe} V_T}{I_C}}{h_{fe}} \cong \frac{V_T}{I_C} = \frac{۲۶}{I_C} < ۲۰ \Rightarrow I_C > \frac{۲۶}{۲۰} = ۱/۳\ mA \quad (۳)$$

از رابطه (۲) داریم:

$$\frac{R_C h_{fe}}{h_{ie}} > ۵۰ \quad \text{یا} \quad \frac{R_e h_{fe}}{\frac{h_{fe} V_T}{I_C}} > ۵۰ \Rightarrow \frac{R_C \cdot I_C}{V_T} > ۵۰ \Rightarrow \frac{R_C I_C}{۲۶} > ۵۰$$

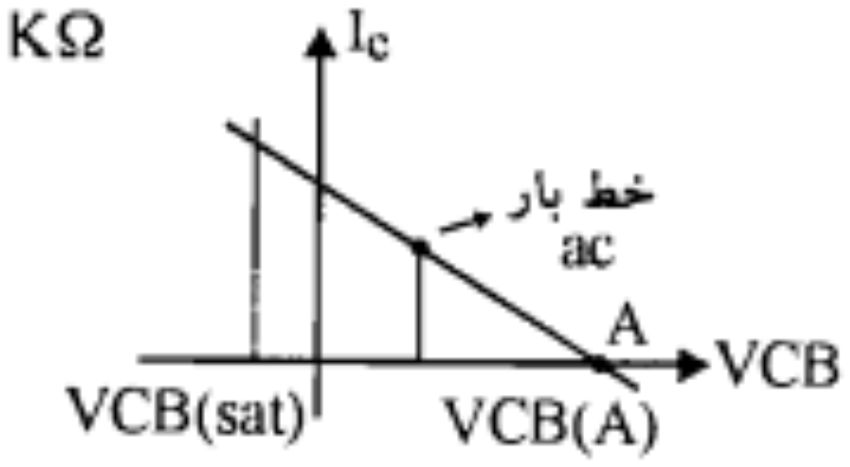
اگر فرض کنیم $I_C = ۱/۳mA$ خواهیم داشت:

$$R_C \times \frac{۱/۳}{۲۶} > ۵۰ \Rightarrow R_C \ge ۱K\Omega$$

R_C را برابر $۱K\Omega$، انتخاب می‌کنیم. و اگر فرض کنیم $R_E = ۱K\Omega$ خواهیم داشت:

$$R_{th} = ۱۰ R_E = ۱۰\ K\Omega$$

با توجه به رابطه خط بار ac داریم:



www.PnuEB.com

برای داشتن حداکثر انحراف متقارن در خروجی، نقطه کار را وسط خط بار ac در نظر می‌گیریم بنابراین:

$$V_{CBQ}=\frac{V_{CB}(A)+V_{CB}(sat)}{۲} \quad , \quad V_{CB}(A)=V_{CBQ}+R_C I_{CQ}$$

$$V_{CBQ}=\frac{V_{CBQ}+R_CI_{CQ}+V_{CB}(sat)}{۲} \Rightarrow \boxed{V_{CBQ}=R_CI_{CQ}+V_{CB}(sat)} \qquad (۴)$$

$$V_{CB}(sat)=V_{CE}(sat)-V_{BE}(sat)=۰/۲-۰/۷=-۰/۵\ Volt$$

بنابراین از رابطه (۴) داریم:

$$V_{CBQ}=۱\times ۱/۵-۰/۵=۱V$$

در حلقه V_{CC}، R_C، V_{CB} و V_{DE}، R_E و زمین داریم:

$$V_{CC}-V_{CBQ}-V_{BE}=R_CI_{CQ}+R_EI_{CQ}$$

$$\Rightarrow V_{CC}=۱+۰/۷+۱\times ۱/۵+۱\times ۱/۵=۴/۷\ V$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$V_{th}=۴/۷\times\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} \quad , \quad R_{th}=\frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲}=۱۰K\Omega$$

در حلقه V_{CC}، V_{CB}، R_{th} و V_{th} داریم:

$$-R_CI_C+R_{th}I_B=-V_{CC}-V_{th}-V_{CB}$$

$$\Rightarrow V_{th}=V_{CC}-R_CI_C+R_{th}\times\frac{I_C}{\beta_{av}}-V_{CB}=۴/۷-۱\times ۱/۵+۱۰\times\frac{۱/۵}{۱۲۵}-۱=۲/۳۲\ V$$

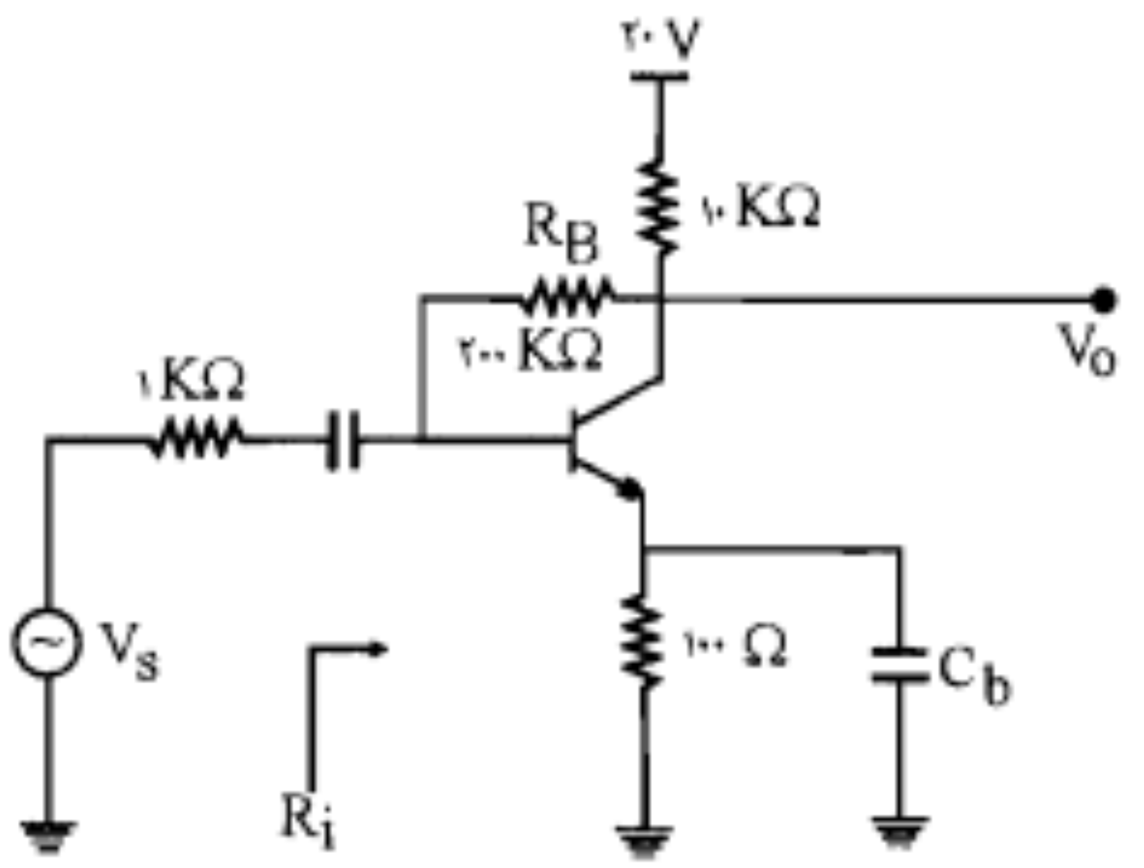
$$B_{av}=\frac{B_{min}+B_{max}}{۲}$$

$$\left.\begin{aligned}۲/۳۲=۴/۷\frac{R_۲}{R_۱+R_۲}\\ \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲}=۱۰K\Omega\end{aligned}\right\}\Rightarrow \begin{aligned}R_۱=۲۰/۲۵\ K\Omega\\ R_۲=۱۹/۷۵\ K\Omega\end{aligned}$$

۵ـ در تقویت کننده شکل م ـ ۵ ترانزیستور دارای $h_{fe}=۱۰۰$ و $h_{oe}=h_{re}=۰$ است.

الف) کمیت‌های A_{vs} و R_i را محاسبه کنید؟

ب) اگر وسط مقاومت R_B را توسط خازن به زمین وصل کنیم. کمیت‌های مذکور چقدر خواهد شد؟



شکل م-۵

راه حل:

الف) برای به دست آوردن h_{ie} ابتدا باید I_C را به دست آوریم.

$$KVL: ۱۰K\Omega(I_C+I_B)+۲۰۰I_B+۰/۱(I_E)=۲۰-۰/۷ \quad , \quad I_E=I_C+I_B$$

$$\Rightarrow ۱۰(I_C+I_B)+۲۰۰I_B+۰/۱(I_C+I_B)=۱۹/۳ \Rightarrow ۱۰/۱(I_C+I_B)+۲۰۰I_B=۱۹/۳$$

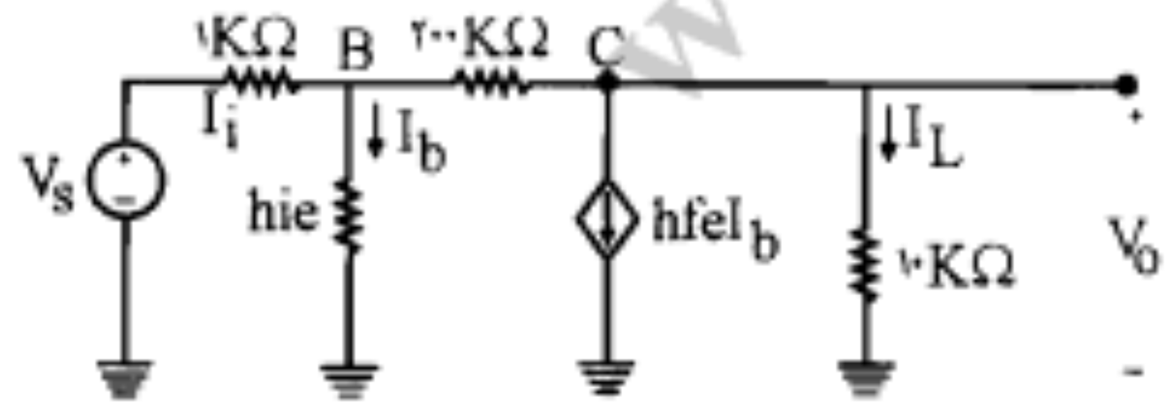
از طرفی: $I_C=\beta I_B=۱۰۰I_B$

$$\Rightarrow ۱۰/۱(\beta I_B+I_B)+۲۰۰I_B=۱۹/۳\Rightarrow ۱۰/۱(۱۰۱I_B)+۲۰۰I_B=۱۹/۳\Rightarrow I_B=۰/۰۱۵$$

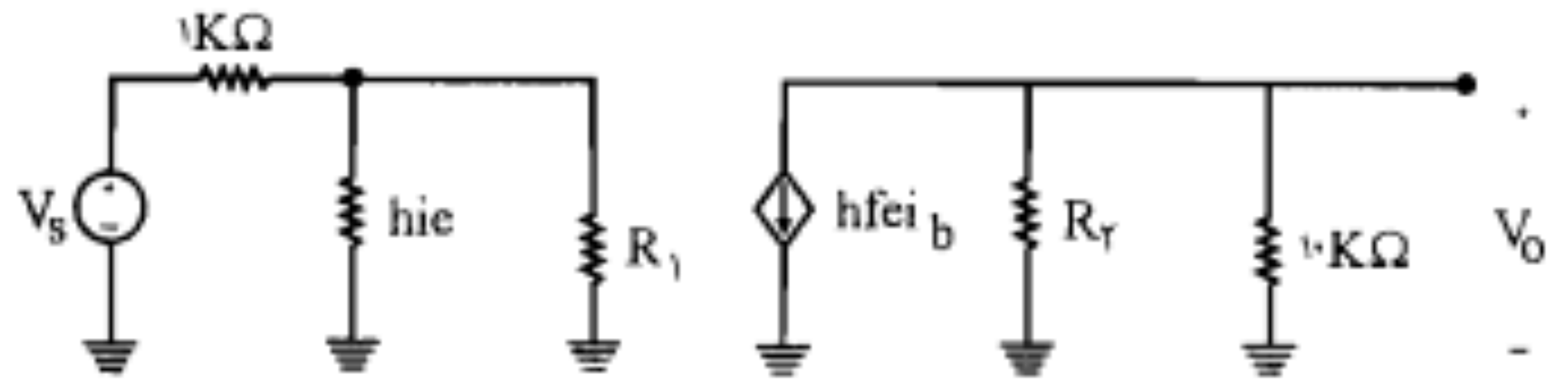
$$\Rightarrow I_C=\beta I_B=۱۰۰\times ۰/۰۱۵۸=۱/۵۸mA\Rightarrow I_C=۱/۵۸\ mA$$

$$\Rightarrow h_{ie}=\frac{h_{fe}V_T}{I_C}=\frac{۱۰۰\times ۲۶}{۱/۵۸}=۱۶۵۴\ \Omega\Rightarrow h_{ie}=۱/۶۴۵\ K\Omega$$

ار معادل را رسم می‌کنیم:



ستفاده از قضیه میلر مقاومت ۲۰۰KΩ را به دو مقاومت $R_۱$ و $R_۲$ تبدیل می‌کنیم:



$$K=A_V=\frac{V_O}{V_i}\Rightarrow R_۲=\frac{۲۰۰K}{K-۱}\simeq ۲۰۰K\Omega$$

$$R'_L=۱۰K\Omega\ ||\ ۲۰۰K\Omega$$

www.PnuEB.com

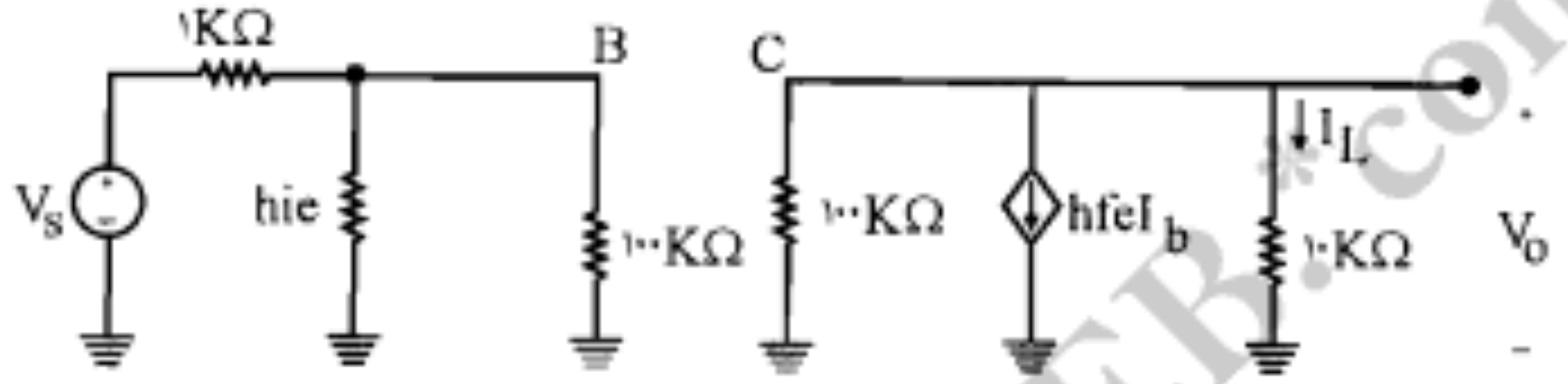
$$AV = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times (۱۰\,K\Omega \parallel ۲۰۰\,K\Omega)}{h_{ie} I_b} = \frac{-۱۰۰ \times (\frac{۱۰ \times ۲۰۰}{۱۰ + ۲۰۰})}{۱/۶۴۵} = -۵۷۸/۹$$

$$\Rightarrow R_۱ = \frac{۲۰۰}{۱-K} = \frac{۲۰۰}{۱-A_V} = \frac{۲۰۰}{۱+۵۷۸/۹} = ۰/۳۴۵\ K\Omega$$

$$R_i = R_۱ \parallel h_{ie} = ۰/۳۴۵ \parallel ۱/۶۴۵ = ۰/۲۸۵\,K\Omega \Rightarrow R_i = ۲۸۵\,\Omega$$

$$A_{VS} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{V_O}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۵۷۸/۹ \times \frac{۰/۲۸۵}{۰/۲۸۵ + ۱} = -۱۲۸/۴$$

ب) اگر وسط مقاومت R_B را توسط خازن به زمین وصل کنیم مدار معادل به صورت زیر می‌باشد.

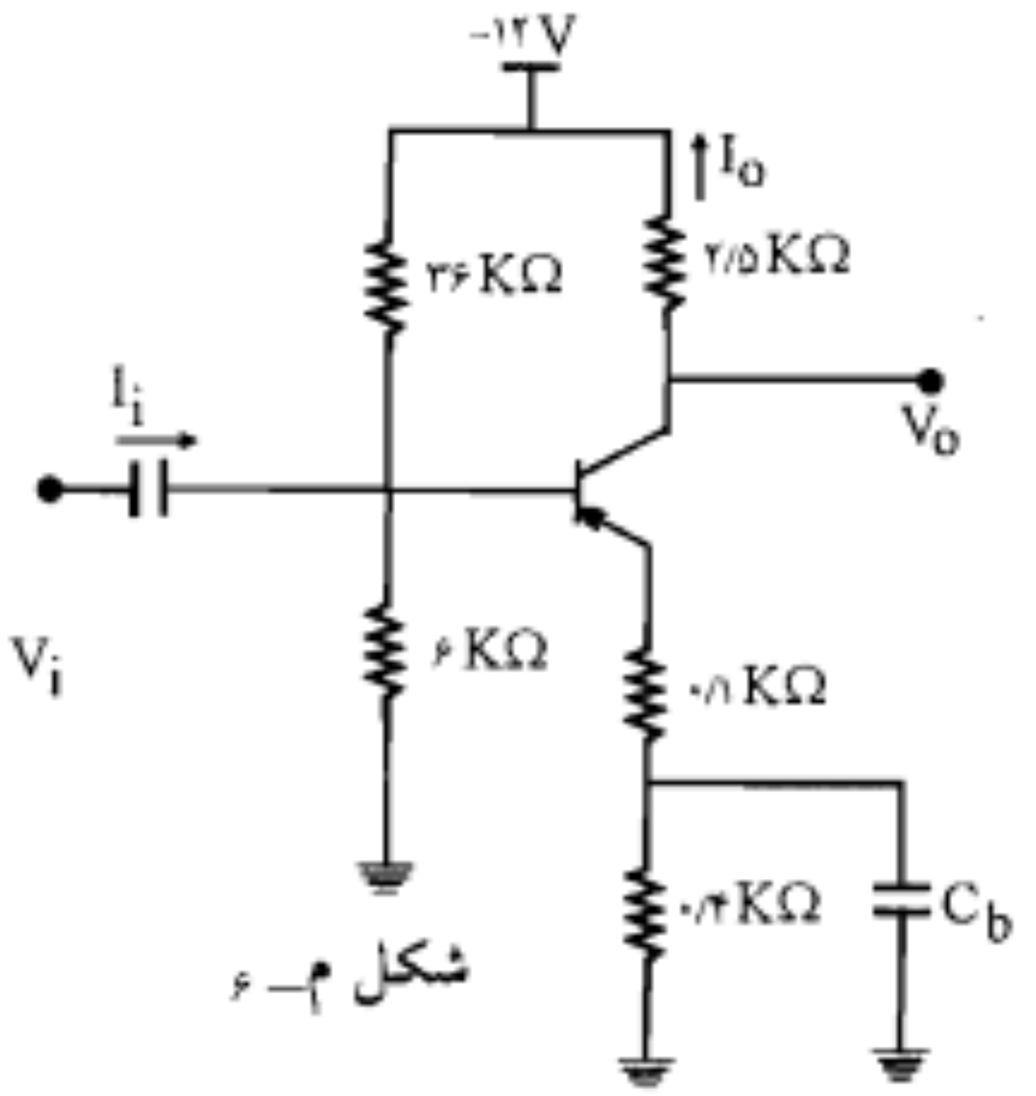


$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times (۱۰\,K\Omega \parallel ۱۰۰\,K\Omega)}{h_{ie} I_b} = \frac{-۱۰۰ \times (\frac{۱۰ \times ۱۰۰}{۱۰ + ۱۰۰})}{۱/۶۴۵} = -۵۵۲/۶$$

$$R_i = ۱۰۰ \parallel h_{ie} = \frac{۱/۶۴۵ \times ۱۰۰}{۱/۶۴۵ + ۱۰۰} = ۱/۶۲\ K\Omega$$

$$A_{VS} = -۵۵۲/۶ \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۵۵۲/۶ \times \frac{۱/۶۲}{۱/۶۲ + ۱} = -۳۴۱/۶$$

۶- در مدار تقویت کننده شکل م ـ ۶، با فرض $h_{fe} = ۱۰۰$ و $h_{re} = h_{oe} = ۰$، بهره جریان، بهره ولتاژ و مقاومت ورودی را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۶

☑ راه حل:

با اجرای تونن در ورودی داریم:

$$\begin{cases} R_{th} = ۶\,K\Omega \parallel ۳۶\,K\Omega = \frac{۶ \times ۳۶}{۶ + ۳۶} = ۵/۱۴ \\ V_{th} = -۱۲ \times \frac{۶}{۶ + ۳۶} = -۱/۷۱\ V \end{cases}$$

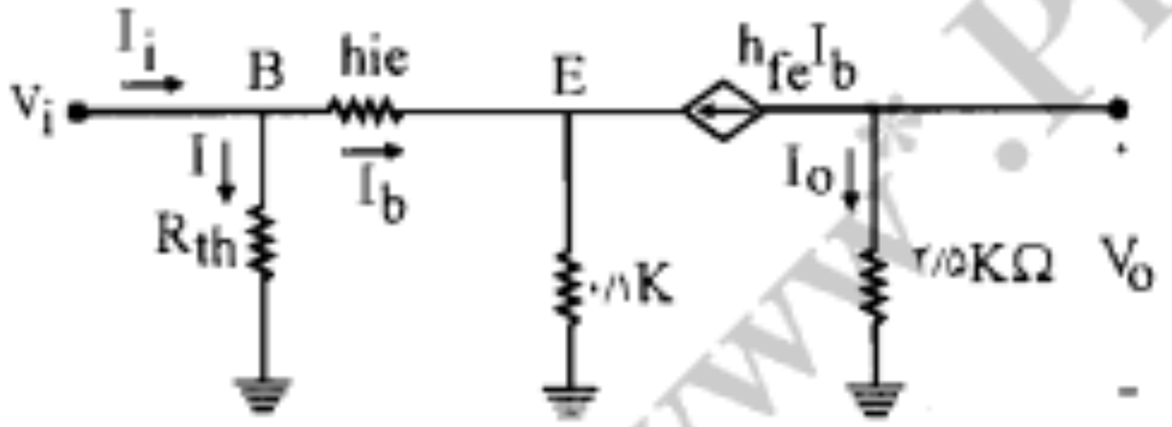
$$KVL: R_{th} I_B + (۰/۱ + ۰/۴) I_E = -(V_{th}) - V_{EB}$$

$$۵/۱۴\, I_B + ۰/۵(۱+\beta) I_B = ۱/۷۱ - ۰/۷ = ۱/۰۱ \Rightarrow I_B = \frac{۱/۰۱}{۵۵/۶۴} = ۰/۰۱۸\,mA$$

$$I_C = \beta I_B = ۱۰۰ \times ۰/۰۱۸ = ۱/۸\ mA$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶}{۱/۸} = ۱/۴۴\,K\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر درمی‌آید:



$$I_\circ = -۱۰۰ I_B \quad , \quad I_i = I_b + I = I_b + \frac{۱/۴۴ I_b + ۰/۱(I_b + ۱۰۰ I_b)}{۵/۱۴}$$

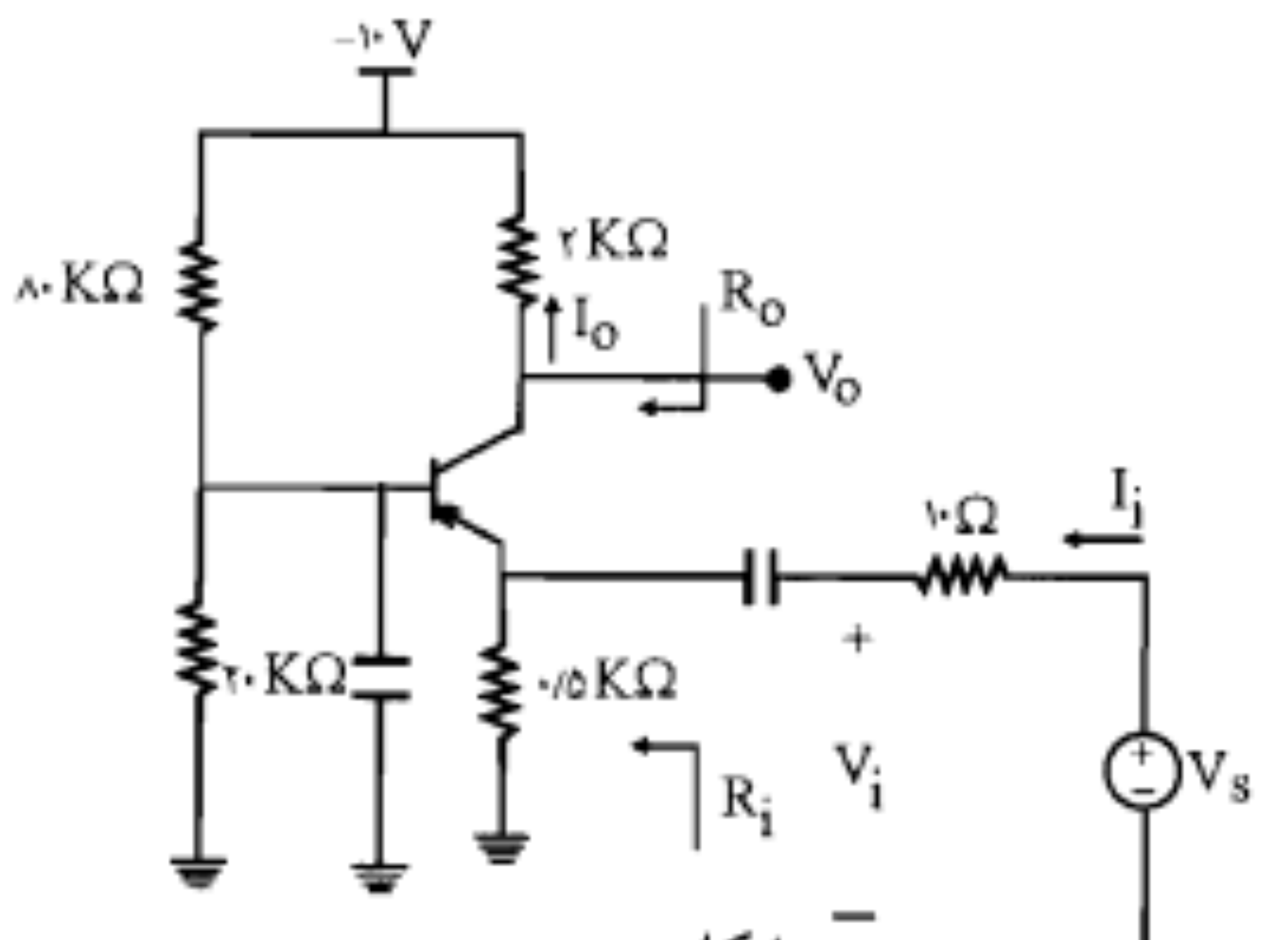
$$\Rightarrow I_i = ۳/۲۴\ I_b \Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-۱۰۰ I_b}{۳/۲۴\ I_b} = -۳۰/۹$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۱/۴۴ I_b + (۰/۱)(I_b + ۱۰۰ I_b)}{۳/۲۴ I_b} = ۳/۵۶\ K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۳۰/۹ \times \frac{۲/۵}{۳/۵۶} = -۲۱/۷$$

www.PnuEB.*com

۷- در مدار شکل م-۷ با فرض $h_{fe}=۱۰۰$، مقادیر A_V، A_{VS}، R_i، A_I و R_O را محاسبه کنید؟

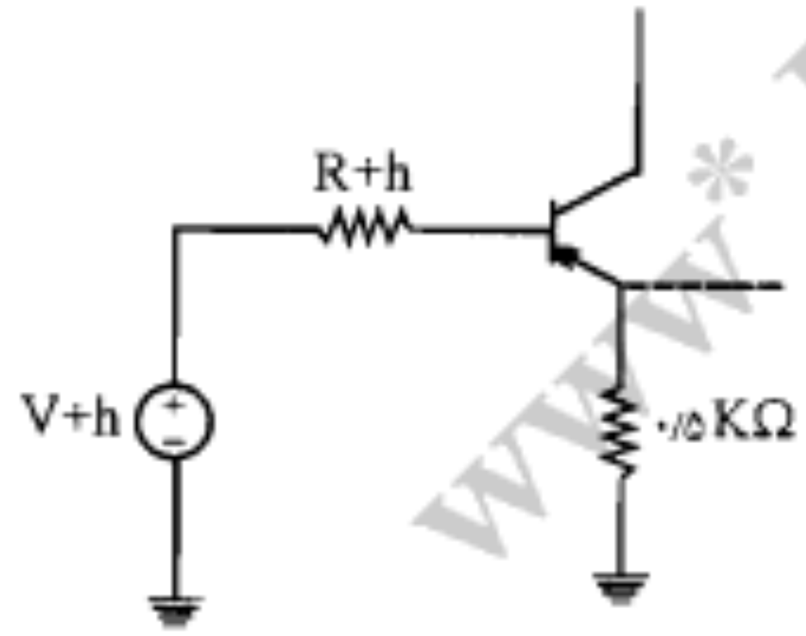


شکل م-۷

☑ راه حل:

ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می‌یابیم:

$$\begin{cases} R_{th}=۲۰KΩ \parallel ۸۰KΩ=\frac{۲۰×۸۰}{۲۰+۸۰}=۱۶KΩ \\ V_{th}=-۱۰×\frac{۲۰}{۲۰+۸۰}=-۲V \end{cases}$$



$$KVL: R_{th}I_B+۰/۵I_E=-V_{th}-V_{EB}$$

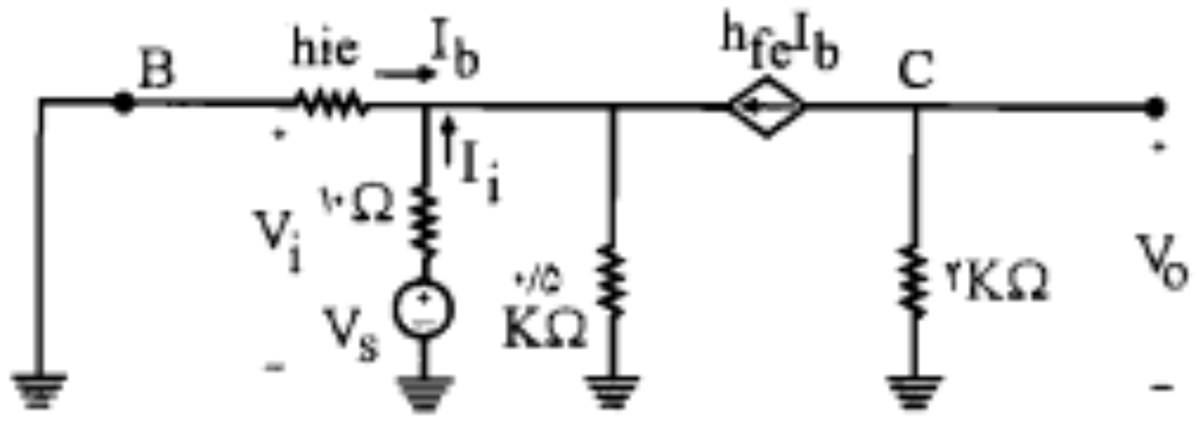
$$\Rightarrow ۱۶I_B+۰/۵(۱+\beta)I_B=+۲-۰/۷=۱/۳$$

$$\Rightarrow I_B(۱۶+۰/۵+۱۰۱)+۱/۳ \Rightarrow I_B=۰/۰۱۹۵\ mA$$

$$\Rightarrow I_C=\beta I_B=۱۰۰×I_B=۱/۹۵\ mA$$

$$\Rightarrow h_{ie}=\frac{h_{fe}V_T}{I_C}=\frac{۱۰۰×۲۶}{۱/۹۵}=۱/۳۳\ KΩ$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_V=\frac{V_O}{V_i}=\frac{-h_{fe}I_b×۲KΩ}{-h_{ie}I_b}=\frac{-۲×۱۰۰}{-۱/۳۳}=۱۵/۰۳$$

$$KCL: I_i+I_b+h_{fe}I_b+\frac{V_i}{۰/۵}=۰ \quad و$$

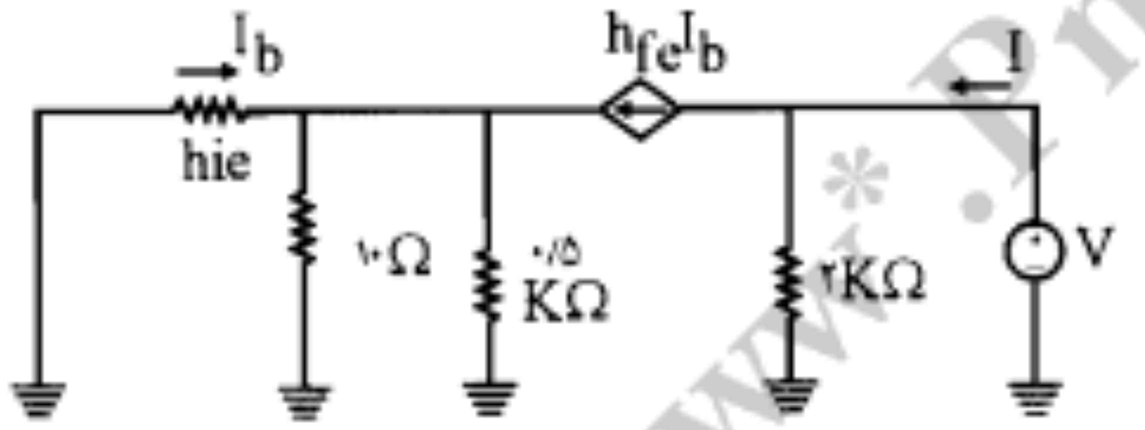
$$\Rightarrow I_i=-(I_b+h_{fe}I_b)-\frac{h_{ie}I_b}{۰/۵}$$

$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{-h_{ie}I_b}{-(I_b+h_{fe}I_b)-\frac{h_{ie}I_b}{۰/۵}}=\frac{h_{ie}}{(۱+h_{fe})-\frac{h_{ie}}{۰/۵}}=\frac{۱/۳۳}{۱۰۱-\frac{۱/۳۳}{۰/۵}}=۱۲/۸Ω$$

$$A_{VS}=A_V×\frac{R_i}{R_i+R_s}=۱۵۰/۳×\frac{۱۲/۸}{۱۲/۸+۱۰^{Ω}}=۸۴/۴$$

$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{I_l}{I_i}=\frac{-h_{fe}I_b}{-(I_b+h_{fe}I_b)-\frac{h_{ie}I_b}{۰/۵}}=\frac{+h_{fe}}{(۱+h_{fe})+۲h_{ie}}=\frac{۱۰۰}{(۱۰۱)+۲×۱/۳۳}=۰/۹۶$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت ۲KΩ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ورودی صفر می‌شود.



$$R_O=\frac{V}{I}$$

از طرفی: $I=\frac{V}{۲KΩ}+h_{fe}I_b \qquad (I)$ و

با استفاده از تقسیم جریان: $I_b=\frac{-h_{fe}I_b×(۱۰^{Ω}\parallel ۰/۵^{KΩ})}{(۱۰^{Ω}\parallel ۰/۵^{KΩ})+h_{ie}}=\frac{-h_{fe}I_b×۱۰}{۱۰+۱/۳۳}$

$$\Rightarrow I_b=(۱+\frac{h_{fe}×۱۰}{۱۱/۳۳})=۰ \Rightarrow I_b=۰$$

$$(I): I=\frac{V}{۲KΩ}+h_{fe}I_b=\frac{V}{۲KΩ} \Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=۲KΩ$$

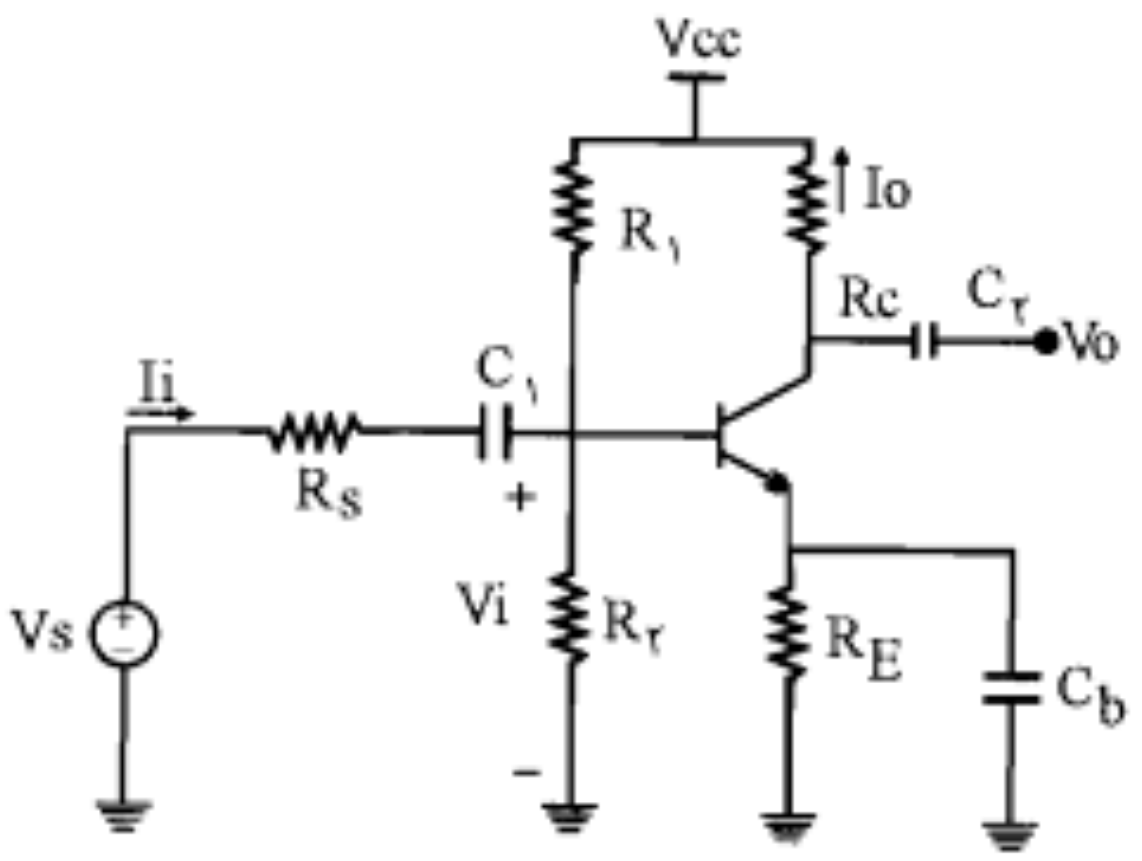
۸- یک تقویت‌کننده امیتر مشترک با $A_V=۲۰۰$ و $R_i=۱KΩ$ را طوری طراحی نمائید که نقطه کار

www.PnuEB.com

آن از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشند. $V_{CC}=18V$ و $h_{fe}=100$ است.

☑ **راه حل:**

شکل کلی تقویت‌کننده به صورت زیر می‌باشد:



معادل تونن در ورودی را می‌یابیم:

$$\begin{cases} R_{th}=\dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2} \\ V_{th}=V_{CC}\times\dfrac{R_2}{R_1+R_2} \end{cases}$$

فرض: $I_C \simeq I_E$

$$KVL: R_{th}I_B+R_EI_E=V_{th}-V_{BE} \Rightarrow R_{th}\times\frac{I_C}{\beta}+R_EI_C=V_{th}-V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_C\left(R_E+\frac{R_{th}}{\beta}\right)=V_{th}-V_{BE} \qquad (I)$$

برای اینکه نقطه‌کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

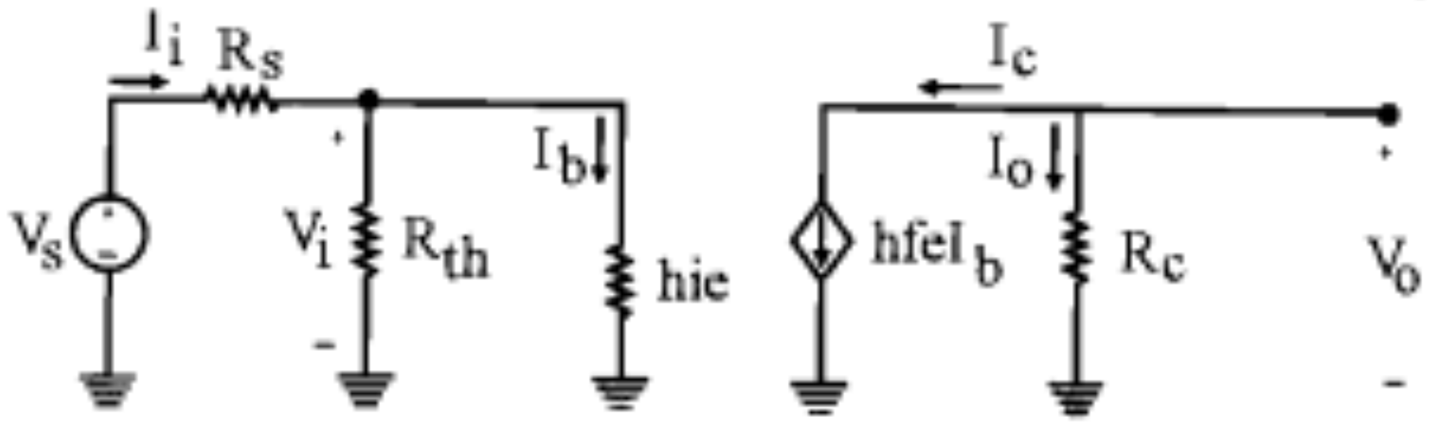
$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}}=0.1R_E$$

$$\Rightarrow R_{th}=0.1\times 100\times R_E=10R_E \qquad (II)$$

با جایگذاری (II) در (I) داریم:

$$I_C=\frac{V_{th}-V_{BE}}{R_E+\frac{10R_E}{100}}=\frac{V_{th}-V_{BE}}{1.1R_E}$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{-h_{fe}I_b}{I_b+\frac{V_i}{R_{th}}}=\frac{-h_{fe}I_b}{I_b+\frac{h_{ie}I_b}{R_{th}}}=\frac{-100R_{th}}{R_{th}+h_{ie}}$$

$$R_i=\frac{R_{th}h_{ie}}{R_{th}+h_{ie}}=\frac{10R_Eh_{ie}}{10R_E+h_{ie}}$$

$$A_V=A_I\times\frac{R_C}{R_i}=\frac{-100R_{th}}{R_{th}+h_{ie}}\times\frac{R_C(R_{th}+h_{ie})}{R_{th}\times h_{ie}}=\frac{-100R_C}{h_{ie}}$$

$$A_V=200 \Rightarrow 200=\frac{-100R_C}{h_{ie}} \Rightarrow \frac{R_C}{h_{ie}}=2 \quad (III)$$

طبق فرض مسئله $R_i=1K\Omega$ می‌باشند پس در رابطه R_i داریم:

$$R_i=\frac{10R_E\times h_{ie}}{10R_E+h_{ie}}=1K\Omega \Rightarrow 10R_Eh_{ie}=10R_E+h_{ie} \Rightarrow 10R_E(-1+h_{ie})=h_{ie}$$

$$\Rightarrow R_E=\frac{h_{ie}}{10(h_{ie}-1)} \qquad (IV)$$

و در تقویت‌کننده بهتر آن می‌باشد که نقطه‌کار وسط خط بار ac باشد یعنی باید داشته باشیم:

$$I_{CQ}=\frac{V_{CC}-V_{CE}(sat)}{R_{ac}+R_{dc}} \qquad \begin{cases} R_{ac}=R_C \\ R_{dc}=R_C+R_E \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_{CQ}=\frac{18}{R_C+R_C+R_E}=\frac{18}{2R_C+R_E} \qquad (V)$$

به جای R_C و R_E مقادیر به دست آمده از روابط (III) و (IV) را قرار می‌دهیم:

$$I_{CQ}=\frac{18}{2\times 2hie+\frac{h_{ie}}{10(h_{ie}-1)}}=\frac{18\times 10\times(h_{ie}-1)}{40h_{ie}(h_{ie}-1)+h_{ie}}$$

$$\Rightarrow 180(h_{ie}-1)=2.6\times 40(h_{ie}-1)+2.6$$

$$\Rightarrow (h_{ie}-1)=\frac{2.6}{76}=0.034 \Rightarrow h_{ie}=1.034\,K\Omega$$

$$(III): R_C=2h_{ie}=2\times 1.034=2.068\,K\Omega$$

www.PnuEB.com

$$(IV): R_E = \frac{h_{ie}}{۱۰(h_{ie}-۱)} = \frac{۱/۰۳۴}{۱۰(۱/۰۳۴-۱)} = ۳/۰۴\ K\Omega$$

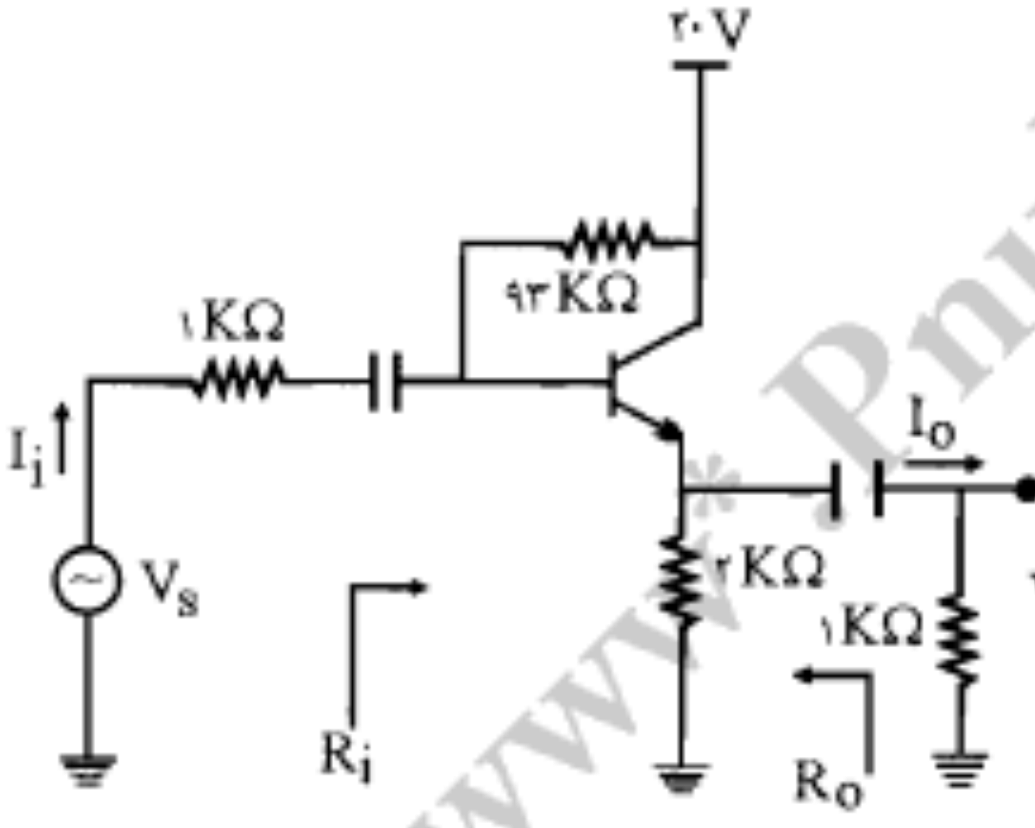
$$(V): I_{CQ} = \frac{۱۸}{۲R_C+R_E} = ۲/۵۱\ mA = \frac{V_{th}-۰/۷}{۱/۱\,R_E} \Rightarrow V_{th} = ۹/۰۹\ V$$

$$R_{th} = ۱۰R_E = ۱۰\times ۳/۰۴ = ۳۰/۴\ K\Omega = \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} \Rightarrow \frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = \frac{۳۰/۴}{R_۱}$$

$$V_{th} = ۹/۰۹ = V_{CC}\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۸\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۸\times\frac{۳۰/۴}{R_۱} \Rightarrow R_۱ = ۵۹/۴۸\ K\Omega$$

$$\Rightarrow R_۲ = \frac{۹/۰۹\times R_۱}{۱۸-۹/۰۹} = ۶۰/۶۸\ K\Omega$$

۹ـ در تقویت کننده امیتر فالوور شکل م ـ ۹ که ترانزیستور آن دارای $h_{fe} = ۵۰$ است. مقادیر A_I، A_{Vs} و R_i و R_O را محاسبه کنید. حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s که تقویت‌کننده در آن خطی می‌ماند چقدر است؟ در صورت افزایش حداکثر ورودی، شکل موج خروجی از بالا زودتر برش داده می‌شود یا از پایین؟ توضیح دهید؟



شکل م ـ ۹

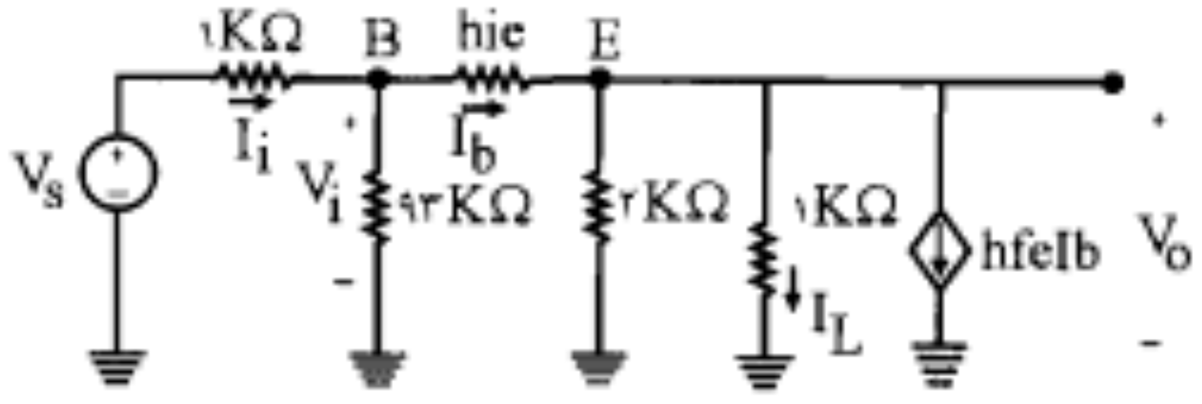
☑ راه حل:

$$KVL: ۹۳I_B + ۲I_E = ۲۰ - V_{BE} = ۲۰ - ۰/۷ = ۱۹/۳ \Rightarrow ۹۳I_B + ۲(۱+\beta)I_B = ۱۹/۳$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{۱۹/۳}{۱۹۵} = ۰/۰۹۸\ mA \Rightarrow I_C = \beta I_B = ۴/۹۵\ mA$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe}V_T}{I_C} = \frac{۵۰\times ۲۶}{۴/۹۵} = ۲۶۲/۶\ \Omega = ۰/۲۶۳\ K\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I = \frac{I_L}{I_i} = \frac{(I_b+h_{fe}I_b)\times\frac{۲}{۱+۲}}{I_b+\frac{V_i}{۹۳}} = \frac{\frac{۲}{۳}I_b(۱+h_{fe})}{I_b+(\frac{h_{ie}I_b+۱\times I_L}{۹۳})}$$

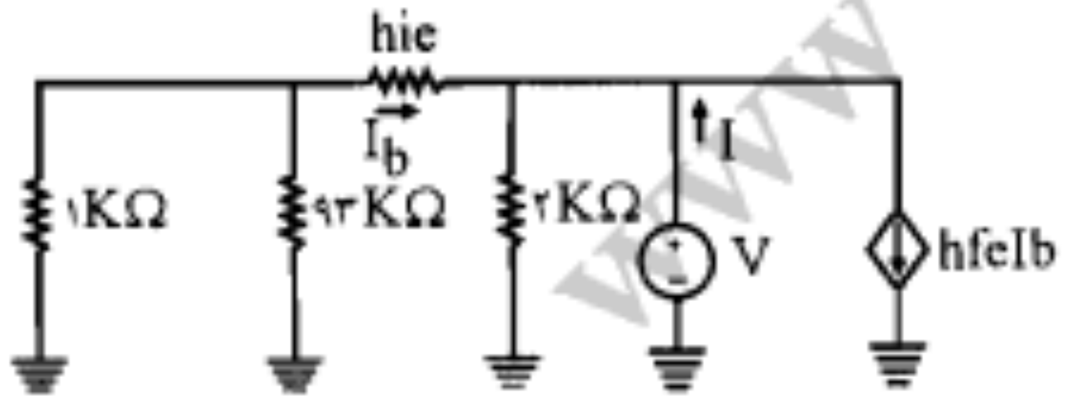
$$= \frac{\frac{۲}{۳}I_b(۱+h_{fe})}{I_b+(\frac{h_{ie}I_b+\frac{۲}{۳}I_b(۱+h_{fe})}{۹۳})} = \frac{\frac{۲}{۳}\times ۵۱}{۱+(\frac{۰/۲۶۳+\frac{۲}{۳}\times ۵۱}{۹۳})} = ۲۴/۸۵$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie}I_b+۱\times I_b}{I_b+\frac{V_i}{۹۳}} = \frac{h_{ie}I_b+\frac{۲}{۳}\times ۵۱I_b}{I_b+\frac{h_{ie}I_b+\frac{۲}{۳}\times ۵۱I_b}{۹۳}} = \frac{۰/۲۶۳+۳۴}{۱+\frac{۰/۲۶۳+۳۴}{۹۳}} = ۲۵K\Omega$$

$$A_V = A_I\times\frac{R_L}{R_i} = ۲۴/۸۵\times\frac{۱}{۲۵} = ۰/۹۹۴$$

$$A_{Vs} = A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s} = ۰/۹۹۴\times\frac{۲۵}{۲۵+۱} = ۰/۹۵$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی R_o یک منبع ولتاژ V را در خروجی موازی با مقاومت ۲KΩ (در نبود مقاومت ۱KΩ) قرار می‌دهیم و منبع ورودی را صفر قرار می‌دهیم:



$$I = -h_{fe}I_b - I_b + \frac{V}{۲} \qquad (I)$$

$$KVL: (۱K\Omega \parallel ۹۳K\Omega)I_b + h_{ie}I_b = -V$$

$$\Rightarrow \frac{۱\times ۹۳}{۱+۹۳}I_b + ۰/۲۶۳I_b = -V \Rightarrow I_b = \frac{-V}{۱/۲۵}$$

$$(I): I = -h_{fe}I_b - I_b + \frac{V}{۲} = -۵۰\times\frac{-V}{۱/۲۵} + \frac{V}{۱/۲۵} + \frac{V}{۲} = V\left[\frac{۵۱}{۱/۲۵}+\frac{۱}{۲}\right] = V\times ۴۱/۳$$

$$\Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۴۱/۳} = ۰/۰۲۴\ K\Omega\ ۵۶\Rightarrow R = ۲۴\,\Omega$$

www.PnuEB.com

به دست آوردن حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s که تقویت‌کننده در آن خطی می‌ماند:

$I_{CQ} = ۴/۹۵\ mA$

$V_{CEQ} = V_{CC} - ۲K\Omega \times I_E = ۲۰ - ۲(\frac{۱+\beta}{\beta}) I_C$

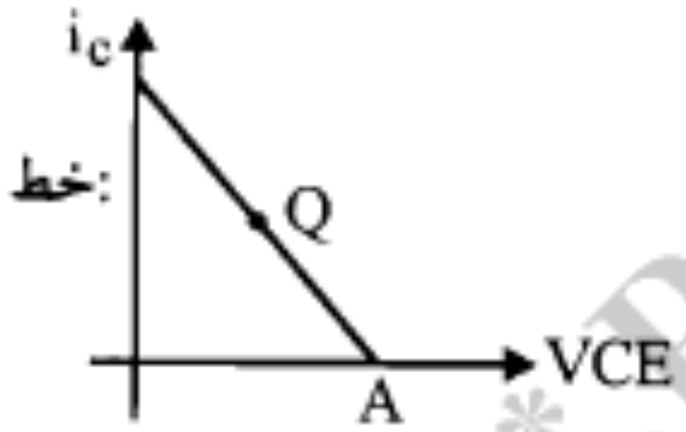
$\Rightarrow V_{CEQ} = ۲۰ - ۲\times\frac{۵۱}{۵۰}\times ۴/۹۵ = ۹/۹\ V$

معادله خط بار ac: $V_{ce} = V_c - V_e = ۰ - R_{ac}\times i_e$, $\begin{cases} R_{ac} = ۲K\Omega \parallel ۱K\Omega = \frac{۲}{۳} \\ i_e = \frac{۱+\beta}{\beta} ic \end{cases}$

$\Rightarrow V_{CE} = -\frac{۲}{۳}\times\frac{۵۱}{۵۰}\ i_c \Rightarrow V_{ce} = -۰/۶۹\ i_c$

$\begin{cases} V_{ce} = V_{CE} - V_{CEQ} \\ i_c = i_C - i_{CQ} \end{cases} \Rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -۰/۶۸\,(i_C - i_{CQ})$

V_{CE} نقطه A به ازای $i_C = ۰$ از معادله خط بار ac به دست می‌آید.



$V_{CE}(A) = V_{CEQ} + ۰/۶۸ i_{CQ}$

$V_{CE}(A) = ۹/۹ + ۰/۶۸\times ۴/۹۵ = ۱۳/۲۷$

قطع $V_{CE} = V_{CE}(A) = ۱۳/۲۷$ نقطه کار $\begin{cases} V_{CEQ} = ۹/۹ \\ V_{CE}(sat) = ۰/۲V \end{cases}$

V_{ce} در حالت قطع $\Rightarrow V_{ce} = V_{CE}(A) - V_{CEQ} = ۱۳/۲۷ - ۹/۹ = ۳/۳۷V$

V_{ce} در حالت اشباع $V_{ce} = ۰/۲ - ۹/۹ = -۹/۷$

$\begin{cases} V_O = -V_{ce} = +۹/۷ & \text{در حالت اشباع} \\ V_۰ = -V_{ce} = -۳/۳۷ & \text{در حالت قطع} \end{cases}$

پس دیده می‌شود حداکثر دامنه خروجی از سمت منفی ۳/۳۷ می‌تواند باشد و سیگنال از این طرف با این دامنه برش می‌خورد. و از سمت بالا ۹/۷ ولت می‌باشد. مقدار متناظر ورودی برای این خروجی عبارت است از:

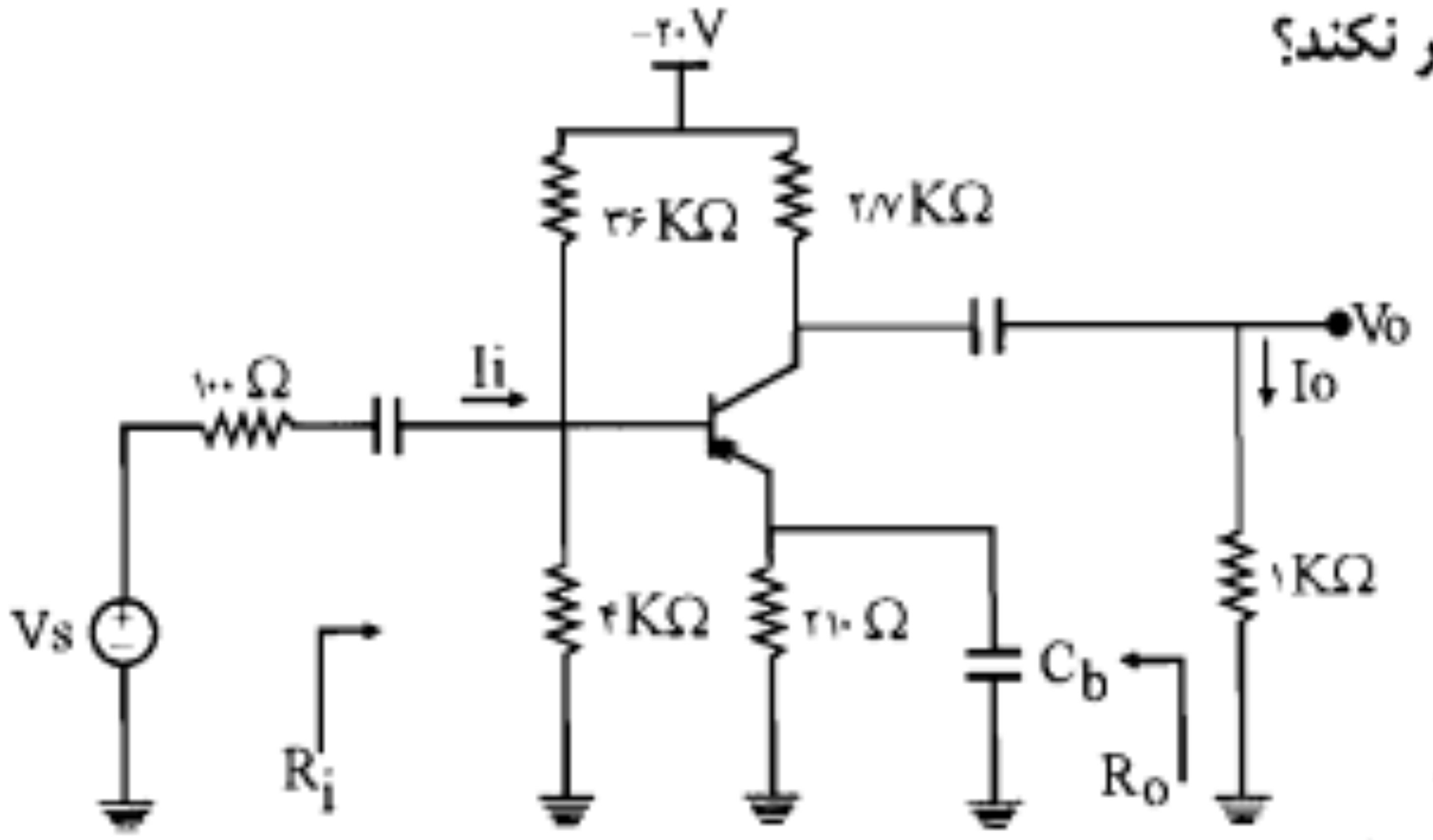
$A_{Vs} = \frac{V_O}{V_s} \Rightarrow V_s = \frac{V_O}{A_{Vs}} = \frac{۳/۳۷}{۰/۹۵۴} = ۳/۵۳$ (مقدار ماکزیمم مجاز بدون برش)

(۱۰) در تقویت‌کننده شکل م ـ ۱۰ ترانزیستور دارای $h_{fe} = ۴۰$ است.

الف) مقادیر A_I ، R_i ، A_V ، A_{Vs} و R_O را محاسبه کنید؟

ب) اگر ترانزیستور را با یک ترانزیستور NPN با همان h_{fe} عوض کنیم. چه تغییراتی در مدار لازم است تا مقادیر بند الف تغییر نکند؟

ج) اگر در مدار جدید ترانزیستور NPN دارای $h_{fe} = ۱۰۰$ باشد مقادیر جدید کمیت‌های A_I ، R_i ، A_V و A_{Vs} چقدر خواهند شد؟

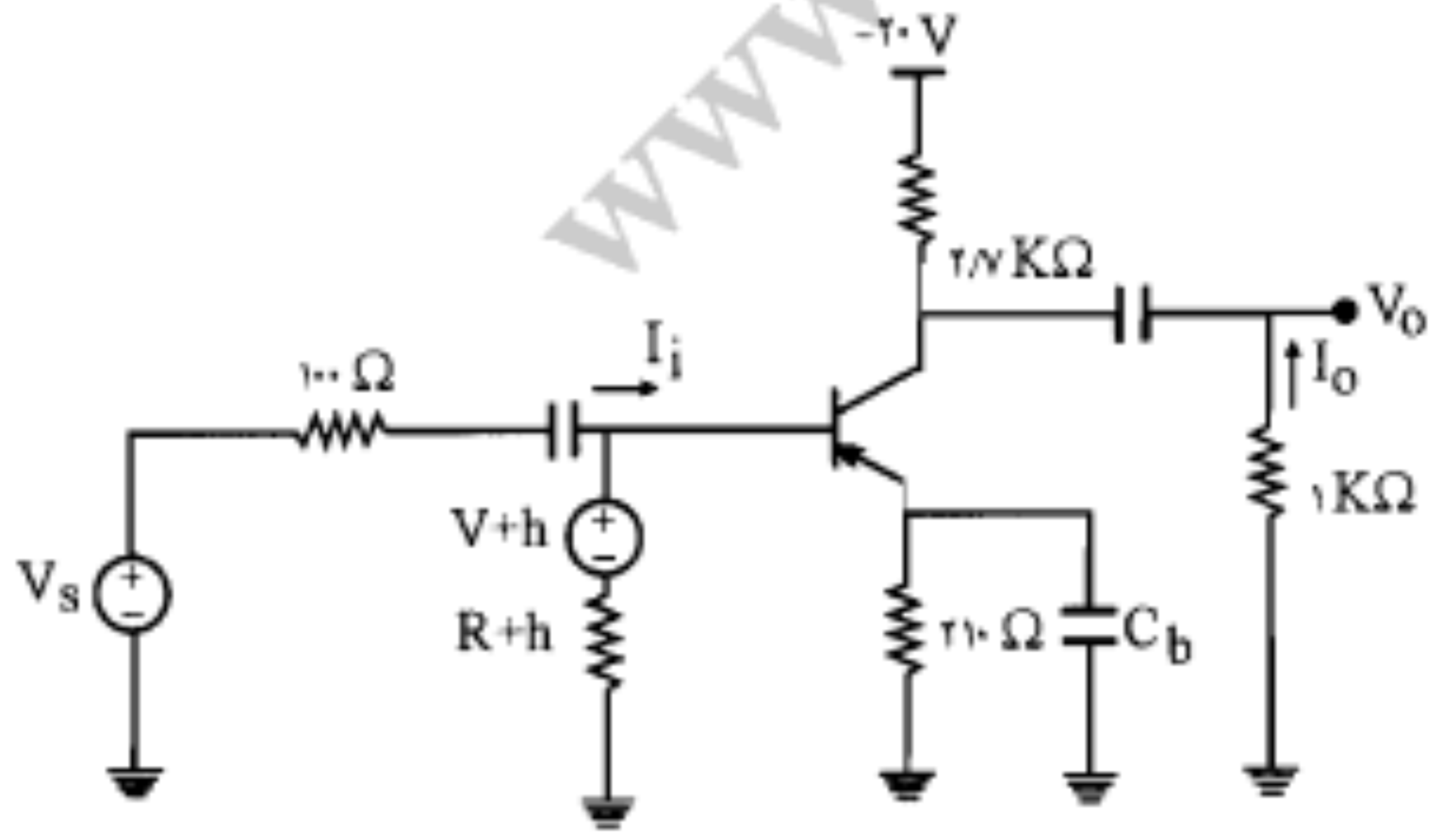


شکل م ـ ۱۰

راه حل:

$\begin{cases} R_{th} = ۴K\Omega \parallel ۳۶K\Omega = \frac{۴\times ۳۶}{۴+۳۶} = ۳/۶\,K\Omega \\ V_{th} = -۲۰\times\frac{۴K\Omega}{۴K\Omega + ۳۶K\Omega} = -۲V \end{cases}$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



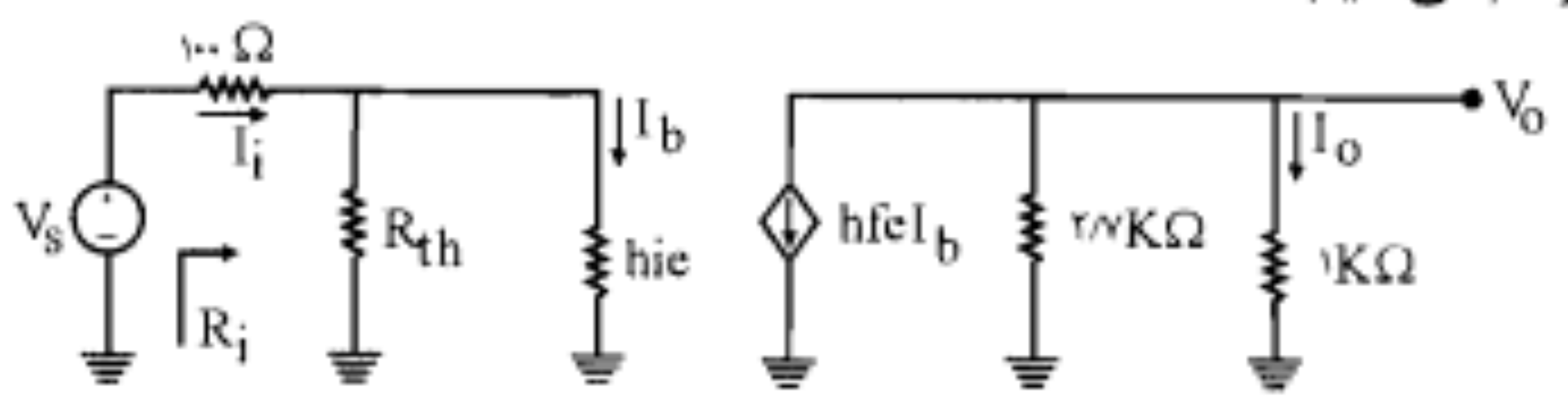
$KVL: R_{th} I_B + ۰/۲۱ I_E = -V_{th} - V_{EB} \Rightarrow ۳/۶ I_B + ۰/۲۱(\beta+۱) I_B = ۲ - ۰/۷ = ۱/۳$

$\Rightarrow I_B = \frac{۱/۳}{۱۲/۲۱} = ۰/۱۰۶\ mA \Rightarrow I_C = ۴۰\times I_B = ۴/۲۶\ mA$

$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{۴۰\times ۲۶}{۴/۲۶} = ۲۴۴\Omega = ۰/۲۴۴\,K\Omega$

www.PnuEB.com

پس با h_{ie} مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{2.7}{2.7+1}}{I_b + \frac{0.244\, I_b}{3.6}} = \frac{-40 \cdot \frac{2.7}{3.7}}{1 + \frac{0.244}{3.6}} = -\frac{29.2}{1.07} = -27.3$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie} = 3.6 \parallel 0.244 = 228.5\ \Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -27.3 \times \frac{1}{0.2285} = -119.5$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -119.5 \times \frac{0.2285}{0.2285 + 0.1} = -8.31$$

$$R_O = 2K\Omega$$

ب) برای این منظور باید منبع V_{CC} را از مقدار ۲۰V- به مقدار ۲۰V+ تغییر داد.

ج)

$$V_{th} = 20 \times \frac{4}{4+36} = 2V$$

$$KVL: R_{th} I_B + 0.21 I_E = +V_{th} - V_{BE} \Rightarrow 3.6 I_B + 0.21(1+\beta) I_B = 2 - 0.7 = 1.3$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{1.3}{24.81} = 0.052\,mA \Rightarrow I_C = \beta I_B = 100 \times 0.052 = 5.2\,mA$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{5.2} = 500\,\Omega \Rightarrow h_{ie} = 0.5K\Omega$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{2.7}{2.7+1}}{I_b + \frac{0.5 I_b}{3.6}} = \frac{-100 \cdot \frac{2.7}{3.7}}{1 + \frac{0.5}{3.6}} = -64$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie} = 3.6 \parallel 0.5 = 0.439\ K\Omega = 439\,\Omega$$

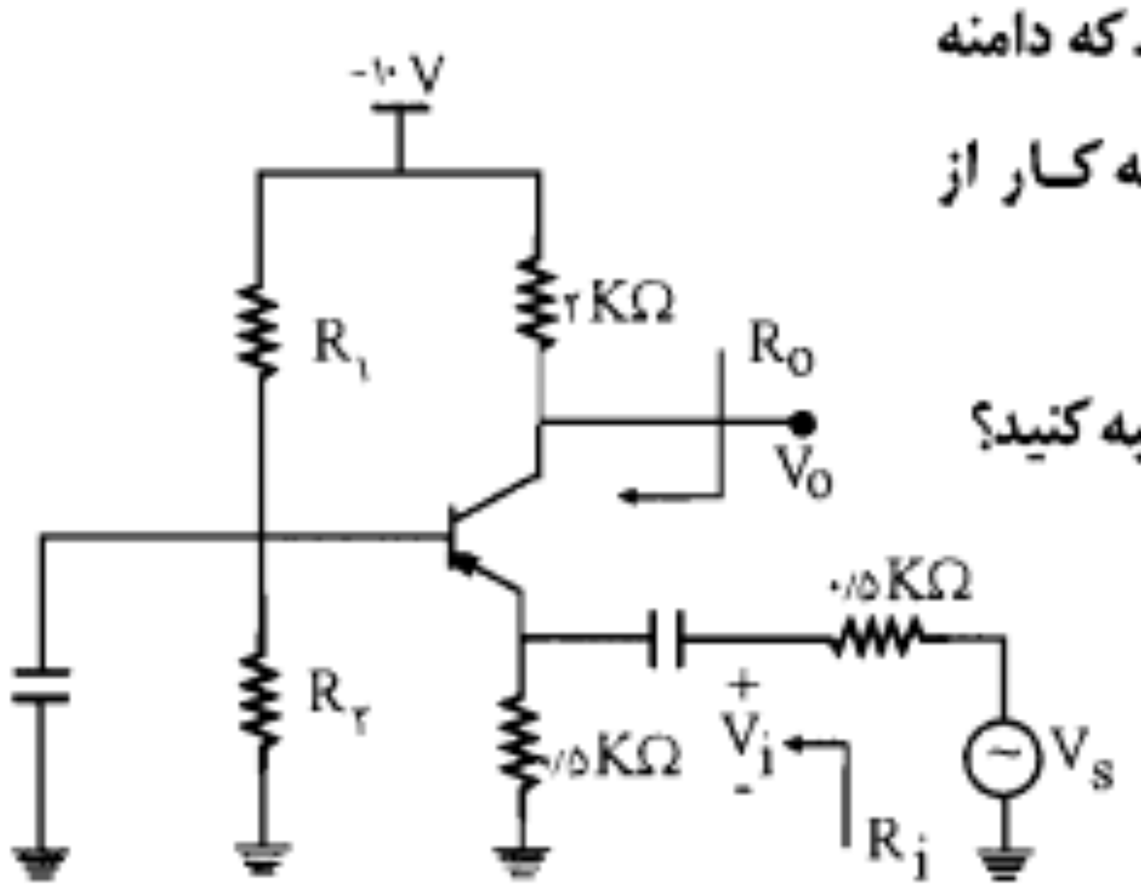
$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -64 \times \frac{1}{0.439} = -145.8$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -145.8 + \frac{0.439}{0.439 + 0.1} = -118.7$$

۱۱ ـ تقویت‌کننده شکل م ـ ۱۱ را در نظر بگیرید. فرض کنید ۱۰۰> β > ۵۰ است.

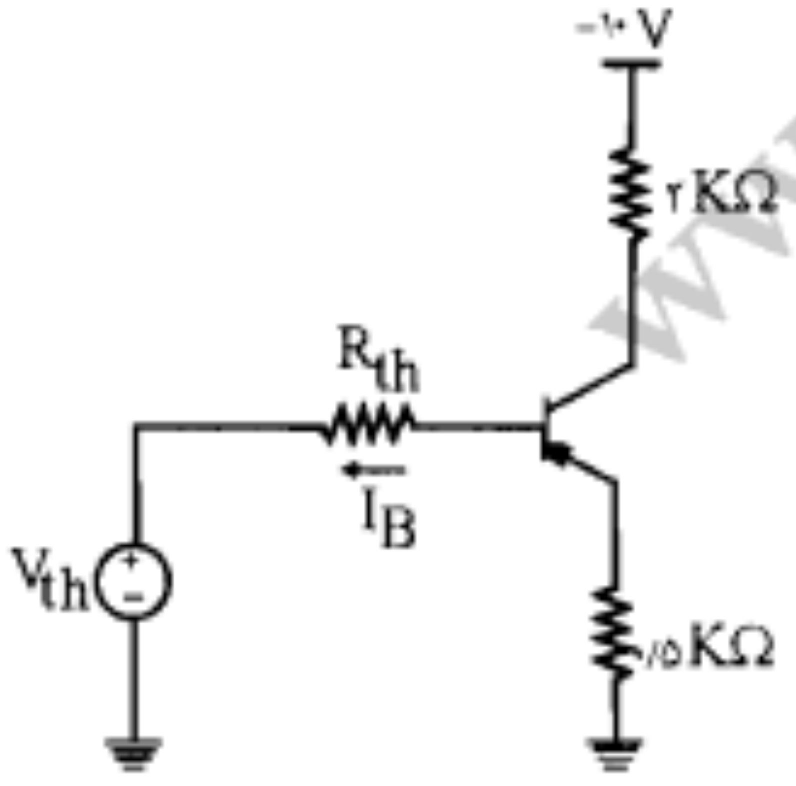
الف) مقاومت‌های R_1 و R_2 را طوری تعیین کنید که دامنه نوسانات متقارن خروجی حداکثر شده و نقطه کار از پایداری مطلوبی در برابر β برخوردار باشد.

ب) مقادیر A_V، A_{V_s}، R_i، A_I و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۱۱

☑ **راه حل:** مدار معادل تونن در ورودی به صورت زیر می‌باشد:



$$KVL: R_{th} I_B + R_E I_E = -V_{th} - V_{EB}$$

$$\Rightarrow R_{th} I_B + R_E \times (1+\beta) I_B = -V_{th} - V_{EB}$$

$$\Rightarrow I_B (R_{th} + (1+\beta) R_E) = -V_{th} - V_{EB} \qquad (I)$$

از طرفی: $I_C = \beta I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta}$

$$(I): \frac{I_C}{\beta}(R_{th} + (1+\beta) R_E) = -V_{th} - V_{EB}$$

برای اینکه نقطه کار از پایداری خوبی در برابر β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

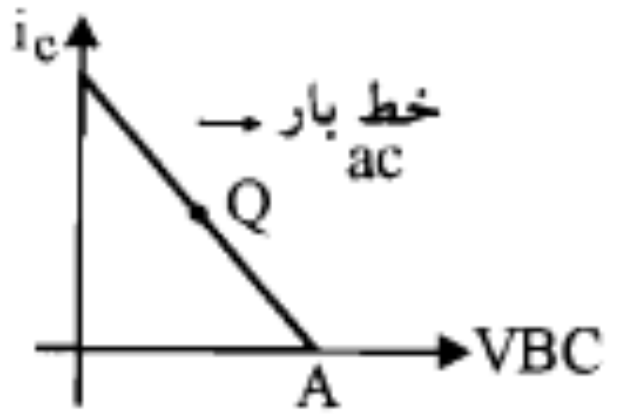
$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} = 0.1 R_E \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta_{min} \times R_E = 0.1 \times 50 \times 0.5 = 2.5K\Omega$$

برای اینکه در تقویت‌کننده بیس مشترک حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را داشته باشیم:

$$V_{BCQ} = \frac{V_{BC}(A) + V_{BC}(sat)}{2} \qquad (II)$$

www.PnuEB.com
www.PnuEB.com

نقطه A محل تلاقی خط بار ac با V_{BC} می‌باشد.



معادله خط بار ac : $V_{BC}-V_{BCQ}=-R_{ac}(i_C-i_{CQ})$

$R_{ac}=۲K\Omega$

$i_C=۰\Rightarrow V_{BC}(A)=V_{BCQ}+۲i_{CQ}$

$$(II):V_{BCQ}=\frac{V_{BC}(A)+V_{BC}(sat)}{۲}$$

از $V_{BC}(sat)$ صرفنظر می‌کنیم.

$$(II):V_{BCQ}=\frac{V_{BC}(A)}{۲}=\frac{V_{BCQ}+۲i_{CQ}}{۲}$$

$\Rightarrow V_{BCQ}=۲i_{CQ}\quad(III)$

$$KVL:۰/۵I_E+۲I_C=-V_{CC}-V_{EB}-V_{BC}\Rightarrow ۰/۵\left(\frac{۱+\beta}{\beta}\right)I_C+۲I_C=-(-۱۰)-V_{EB}-۲I_C$$

$$\beta=\beta_{av}=\frac{۵۰+۱۰۰}{۲}=۷۵$$

$$\Rightarrow ۰/۵\left(\frac{۱+۷۵}{۷۵}\right)I_C+۲I_C=۱۰-۲I_C-۰/۷=۹/۳-۲I_C\Rightarrow I_C=۲/۰۶mA$$

در حلقه ورودی KVL را می‌نویسیم:

$$R_{th}I_B+۰/۵(I_B+I_C)=-V_{th}-۰/۷=-V_{th}-۰/۷$$

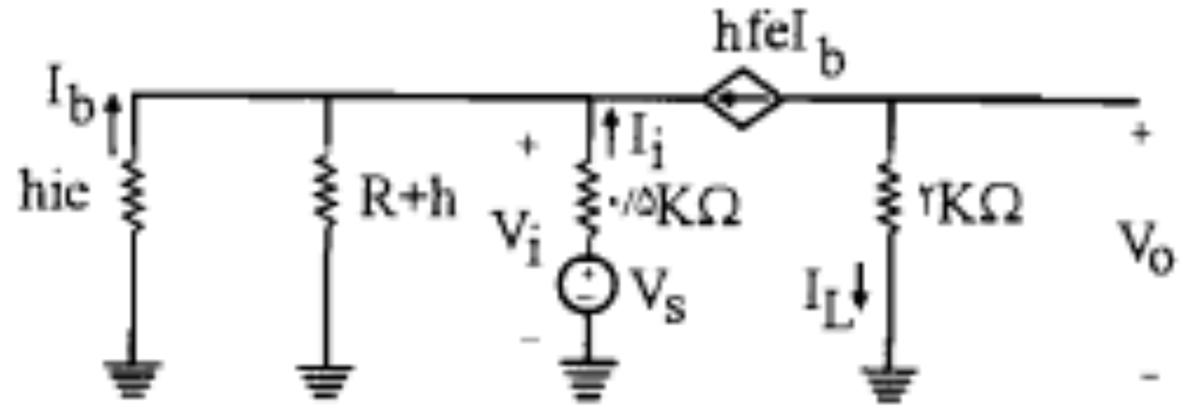
$$\beta_{av}=۷۵\Rightarrow ۲/۵\times\frac{۲/۰۶}{۷۵}+۰/۵\left(\frac{۲/۰۶}{۷۵}+۲/۰۶\right)=-V_{th}-۰/۷$$

$\Rightarrow V_{th}=-۱/۸۱۲$

$$\begin{cases}R_{th}=۲/۵=\dfrac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲}\\[2mm] V_{th}=-۱۰\dfrac{R_۲}{R_۱+R_۲}=-۱/۸۲\Rightarrow\dfrac{R_۲}{R_۱+R_۲}=۰/۱۸۲\end{cases}\Rightarrow R_۱\times۰/۱۸۲=۲/۵\Rightarrow R_۱=۱۳/۸K\Omega \text{ و } R_۲=۳/۰۵K\Omega$$

ب) $h_{ie}=\dfrac{h_{fe}V_T}{I_C}=\dfrac{۷۵\times۲۶}{۲/۰۶}=۰/۹۴K\Omega$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{-h_{fe}I_B}{-h_{fe}I_b-I_b-\frac{h_{ie}I_b}{۰/۵}}=\frac{۰/۹۴}{۷۵+۱+\frac{۰/۹۴}{۰/۵}}=۰/۹۷$$

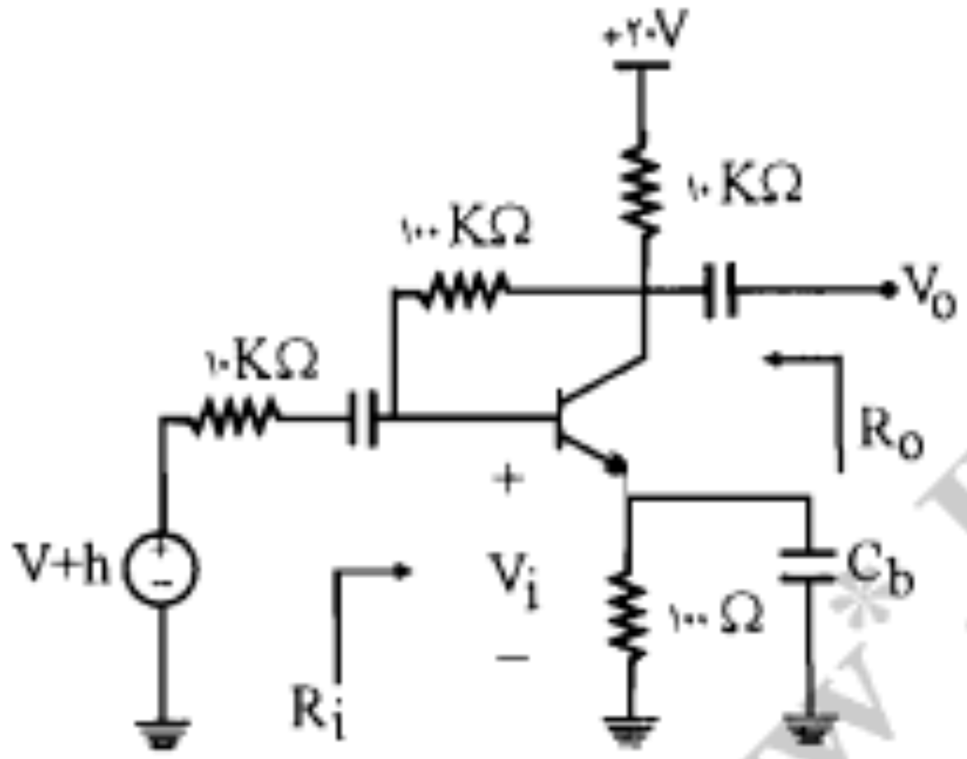
$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{-h_{ie}I_b}{-h_{fe}I_b-I_b-\frac{h_{ie}I_b}{۰/۵}}=\frac{۰/۹۴}{۷۵+۱+\frac{۰/۹۴}{۰/۵}}=۱۲\Omega$$

$$A_V=A_I\times\frac{R_L}{R_i}=۰/۹۷\times\frac{۲}{۱۲\times۱۰^{-۳}}=۱۶۱/۷$$

$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=۱۶۱/۷\times\frac{۱۲\times۱۰^{-۳}}{۱۲\times۱۰^{-۳}+۰/۵}=۳/۸$$

$R_O=۲K\Omega$

۱۲ـ در تقویت کننده شکل م ـ ۱۲ با فرض $h_{fe}=۱۵۰$ و $h_{oe}^{-۱}=۳۰K\Omega$ و $h_{re}=۲\times۱۰^{-۴}$، با استفاده از دل دقیق هیبرید h مقادیر کمیت‌های A_I ، R_i ، A_V ، A_{V_s} و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م-۱۲

☑ **راه حل:**

$$KVL:۱۰(I_B+I_C)+۱۰۰I_B+۰/۱I_E=V_{CC}-V_{BE}=۲۰-۰/۷=۱۹/۳$$

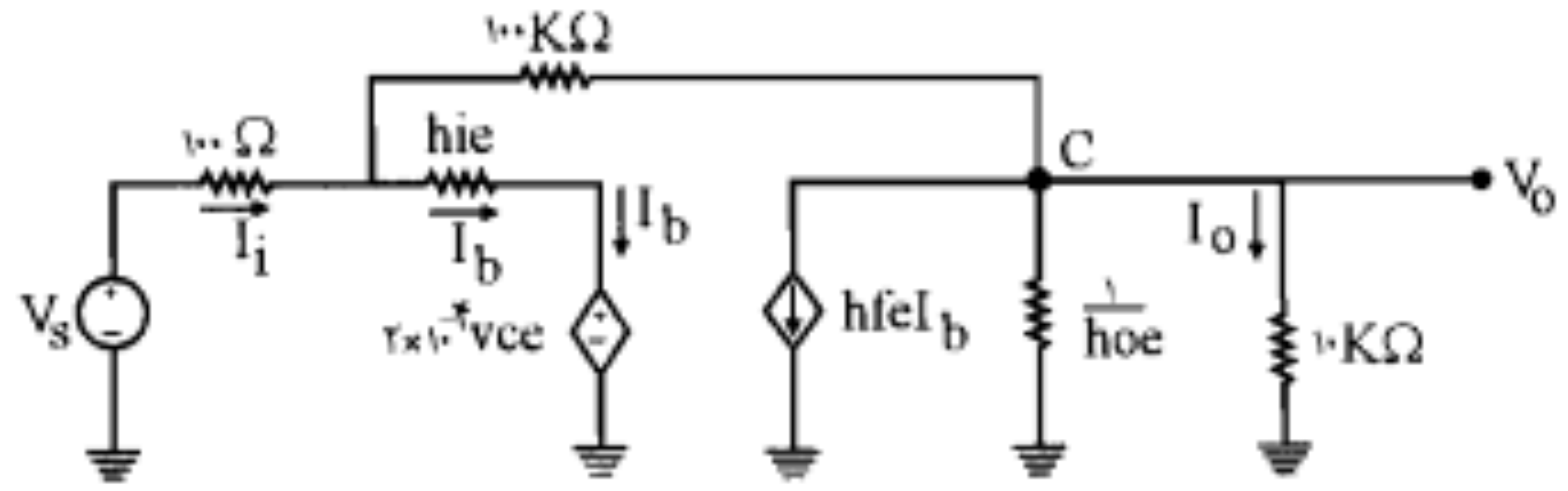
$$\Rightarrow ۱۰(I_B+I_C)+۱۰۰I_B+۰/۱(I_B+I_C)=۱۹/۳\Rightarrow ۱۰/۱(I_B+I_C)+۱۰۰I_B=۱۹/۳$$

$$\Rightarrow ۱۰/۱\times(I_B+\beta I_B)+۱۰۰I_B=۱۹/۳\Rightarrow I_B=\frac{۱۹/۳}{۱۰۰+۱۰/۱\times۱۵۱}=۰/۰۱۱$$

$I_C=\beta I_B=۱/۷۸mA$

$$h_{ie}=\frac{h_{fe}V_T}{I_C}=\frac{۱۵۰\times۲۶}{۱/۷۸}=۲۱۹۱\Omega=۲/۱۹۱K\Omega$$

مدار معادل را رسم می‌کنیم:



www.PnuEB.com

در حلقه ۱۰KΩ و ۱۰۰KΩ و h_{ie} و V_{ce} ، ۲×۱۰^{-۴} ، KVL می‌نویسیم:

$$KVL: -h_{ie}I_b + (I_i - I_b)\times ۱۰۰K\Omega + ۱۰ I_O = ۲\times ۱۰^{-۴} V_{ce} = ۲\times ۱۰^{-۴} V_O$$

$$\begin{cases} V_O = V_{ce} & \Rightarrow -۲/۱۹ I_b + ۱۰۰(I_i - I_b) + ۱۰ I_O = ۲\times ۱۰^{-۴}\times ۱۰ V_O \Rightarrow \\ V_O = ۱۰ I_O & ۱۰۰ I_i - ۱۰۲/۱۹ I_b + (۱۰ - ۲\times ۱۰^{-۳}) I_O = ۰ \qquad (I) \end{cases}$$

$$KCL: I_i - I_b = I_{۱۰۰K\Omega} = h_{fe} I_b + I_O + \frac{۱۰ I_O}{h_{oe}^{-1}} = ۱۵۰ I_b + I_O + \frac{۱۰ I_O}{۳۰}$$

$$\Rightarrow ۱۵۱ I_b = I_i - \frac{۴}{۳} I_O \Rightarrow I_b = \frac{I_i}{۱۵۱} - \frac{۴}{۴۵۳} I_O \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) جایگذاری می‌کنیم:

$$۱۰۰ I_i - ۱۰۲/۱۹ \times \left(\frac{I_i}{۱۵۱} - \frac{۴}{۴۵۳} I_O\right) + (۱۰ - ۲\times ۱۰^{-۳}) I_O = ۰$$

$$\Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = -۹/۱$$

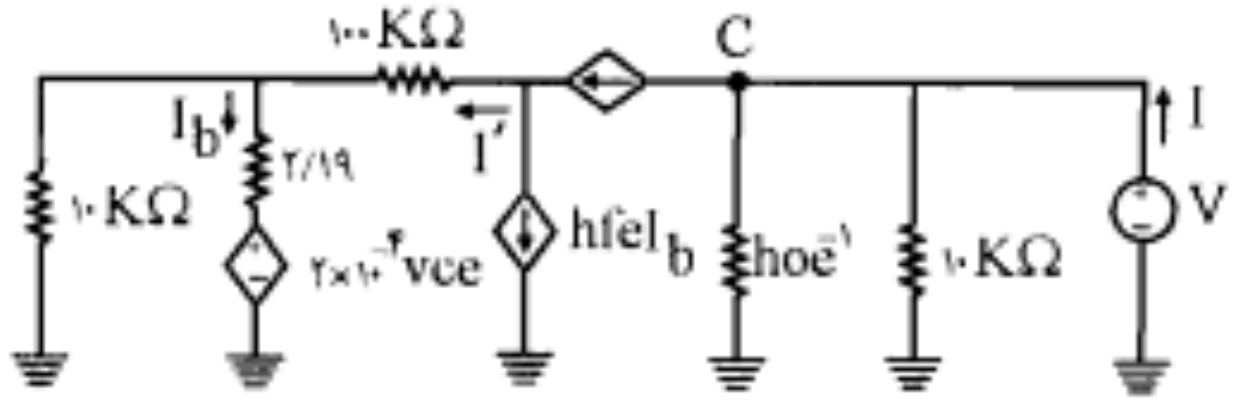
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b + ۲\times ۱۰^{-۴} V_{ce}}{I_i} = \frac{۲/۱۹ I_b + ۲\times ۱۰^{-۴}\times ۱۰ I_O}{I_i} = \frac{۲/۱۹\left(\frac{I_i}{۱۵۱} - \frac{۴}{۴۵۳} I_O\right) + ۲\times ۱۰^{-۳} I_O}{I_i}$$

$$= \frac{۲۱۹}{۱۵۱} - \frac{۴\times ۲/۱۹}{۴۵۳} A_I + ۲\times ۱۰^{-۳} A_I = \frac{۲/۱۹}{۱۵۱} - \frac{۴\times ۲/۱۹}{۴۵۳}\times(-۹/۱) + ۲\times ۱۰^{-۳}(-۹/۱) = ۱۷۲\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۹/۱ \times \frac{۱۰}{۰/۱۷۲} = -۵۲۹$$

$$A_{Vs} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۵۲۹ \times \frac{۰/۱۷۲}{۰/۱۷۲ + ۱۰} = -۸/۹۵$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی یک منبع ولتاژی V را در خروجی در دو سر مقاومت ۱۰KΩ قرار می‌دهیم و ورودی را صفر می‌کنیم:



$$KCL: I = \frac{V}{۱۰} + \frac{V}{h_{Oe}^{-1}} + h_{fe} I_b + I' \quad (I)$$

$$I' = I_b + I_{۱۰K\Omega}$$

$$\Rightarrow I' = I_b + \frac{۲/۱۹ I_b + ۲\times ۱۰^{-۴} V_{ce}}{۱۰} \quad , \quad V_{ce} = V \Rightarrow I' = I_b + \frac{۲/۱۹ I_b + ۲\times ۱۰^{-۴} V}{۱۰}$$

$$\Rightarrow I' = ۱/۲۱۹ I_b + ۲\times ۱۰^{-۵} V \quad (II)$$

$$KVL: ۱۰۰ I' + ۲/۱۹ I_b = V - ۲\times ۱۰^{-۴} V_{ce} = V - ۲\times ۱۰^{-۴} V = ۰/۹۹۹۸ V$$

$$\Rightarrow ۱۰۰(۱/۲۱۹ I_b + ۲\times ۱۰^{-۵} V) + ۲/۱۹ V = ۰/۹۹۹۸ V$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{۰/۹۹۷۸}{۱۲۴/۰۹} V = ۸/۰۴ \times ۱۰^{-۳} V$$

$$\Rightarrow I' = ۱/۲۱۹ \times ۸/۰۴ \times ۱۰^{-۳} V + ۲\times ۱۰^{-۵} V = ۹/۸۲ \times ۱۰^{-۳} V$$

$$(I): \quad I = \frac{V}{۱۰} + \frac{V}{۳۰} + ۱۵۰ \times ۸/۰۴ \times ۱۰^{-۳} V + ۹/۸۲ \times ۱۰^{-۳} V$$

$$\Rightarrow I = V\left(۰/۱ + \frac{۱}{۳۰} + ۱۵۰ \times ۸/۰۴ \times ۱۰^{-۳} + ۹/۸۲ \times ۱۰^{-۳}\right) = ۱/۳۴۹$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۱/۳۴۹} = ۷۴۱\,\Omega$$

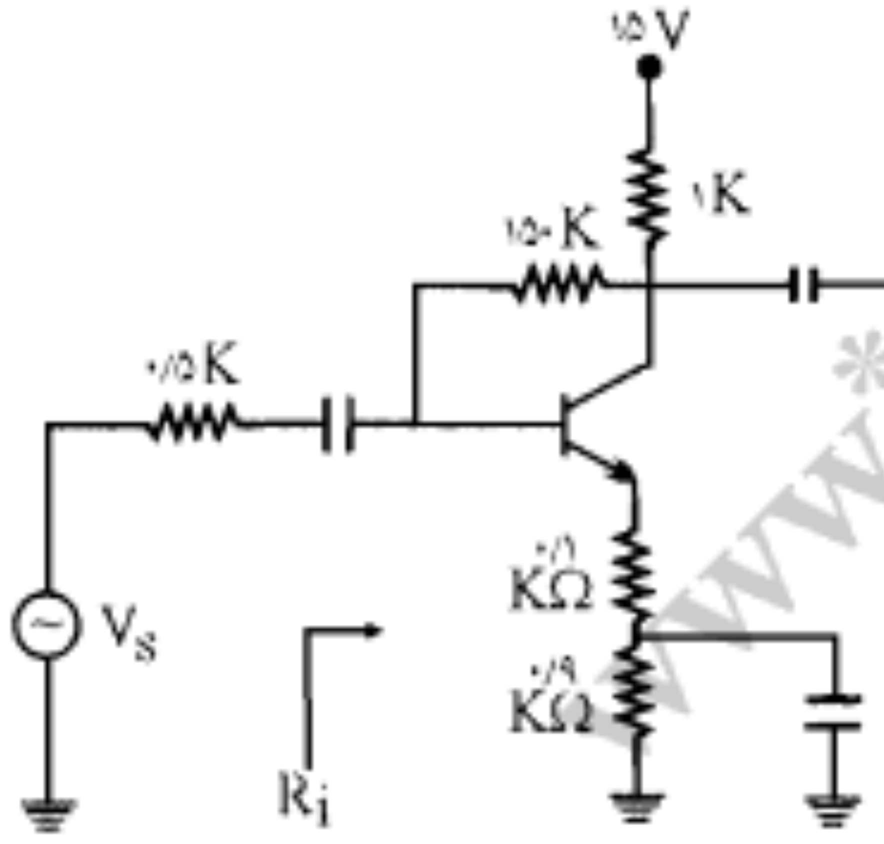
۱۳ ـ در مدار شکل م ـ ۱۳ با فرض $h_{oe} \cong ۰$ ، $h_{re} \cong ۰$ ، $h_{fe} \cong ۱۵۰$ و $V_{CE}(sat) = ۰/۲V$

الف) نقطه کار DC را تعیین کنید؟

ب) معادله خط بار DC و ac را بنویسید؟

ج) حداکثر دامنه نوسان بدون اعوجاج ولتاژ خروجی از بالا و پایین تقریباً چقدر است؟

د) مقادیر کمیت‌های A_V ، A_{Vs} ، A_I ، R_i و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م- ۱۳

☑ **راه حل:** برای به دست آوردن نقطه کار باید V_{CEQ} و I_{CQ} را به دست آوریم:

در حلقه V_{CC} و ۱KΩ و ۱۵۰KΩ و ۰/۱KΩ و ۰/۹KΩ و V_{BE} و زمین KVL را می‌نویسیم:

$$۱K\Omega \times (I_C + I_B) + ۱۵۰ I_B + ۰/۱ I_E + ۰/۹ I_E = V_{CC} - V_{BE} = ۱۵ - ۰/۷ = ۱۴/۳$$

$$۱ \times (I_C + I_B) + ۱۵۰ I_B + (۰/۱ + ۰/۹)(I_C + I_B) = ۱۴/۳$$

$$\Rightarrow ۲\times(I_C + I_B) + ۱۵۰ I_B = ۱۴/۳ \Rightarrow ۲(۱+\beta) I_B + ۱۵۰ I_B = ۱۴/۳$$

$$I_B \times (۱۵۰ + ۲\times ۱۵۱) = ۱۴/۳ \Rightarrow I_B = \frac{۱۴/۳}{۱۵۰ + ۳۰۲} = ۰/۰۳۲ \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = ۱۵۰ \times ۰/۰۳۲ = ۴/۷۴ \text{ mA} \Rightarrow I_{CQ} = ۴/۷۴ \text{ mA}$$

www.PnuEB.com

dc معادله خط بار $V_{CE} \simeq V_{CC} - ۱K\Omega\,(I_C + I_B) - (۰/۱ + ۰/۹)\,(I_B + I_C)$

$$\Rightarrow V_{CE} = ۱۵ - ۲(I_C + I_B) = ۱۵ - ۲(۱+\beta)\,I_B = ۱۵ - ۲\frac{(۱+\beta)}{\beta}\,I_C$$

$$\Rightarrow V_{CE} = ۱۵ - ۲\times\frac{۱۵۱}{۱۵۰}\,I_C = ۱۵ - ۲\times\frac{۱۵۱}{۱۵۰}\times ۴/۷۴\ mA = ۵/۴۶\ V$$

$\Rightarrow$ DC نقطه‌کار : $\begin{cases} I_{CQ} = ۴/۷۴\ mA \\ V_{CEQ} = ۵/۴۶\ V \end{cases}$

DC معادله خط بار : $V_{CE} = ۱۵ - ۲\times\frac{(۱+\beta)}{\beta}\,I_C = ۱۵ - ۲/۰۱۳\,I_C$

ac معادله خط بار : $V_{ce} = -R_{ac}\,i_c$

$R_{ac} = (۱K\Omega \parallel ۱K\Omega) + ۰/۱ = \frac{۱\times۱}{۱+۱} + ۰/۱ = ۰/۶\,K\Omega$

$V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}\,(i_C - i_{CQ})$

$V_{CE} - ۵/۴۶ = -۰/۶\,(i_C - ۴/۷۴) \Rightarrow V_{CE} = ۸/۳ - ۰/۶\,i_C$

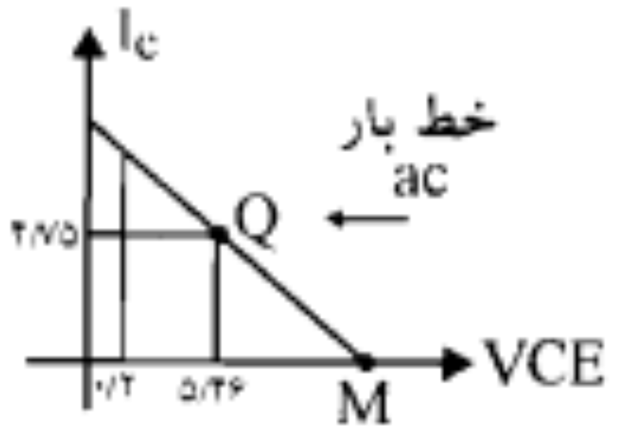
ac معادله خط بار : $V_{CE} = ۸/۳ - ۰/۶\,i_C$

ج)

محل تلاقی خط بار ac را با محور V_{CE} ، M می‌نامیم و داریم:

$V_{CE}(M) = ۸/۳ - ۰/۶\times ۰ = ۸/۳\,V$

$V_o = V_{ce} + ۰/۱\,I_C = ۸/۳ + ۰/۱\times ۰ = ۸/۳$



اگر $I_C = I_{CQ}$ و $V_{CE} = V_{CEQ}$ باشد، خروجی V_o مقدار dc خروجی خواهد شد. و داریم:

$V_o = ۵/۴۶ + ۰/۱\times ۴/۷۴ = ۵/۹۳\,V$

برای محاسبه جریان اشباع به جای V_{CE} مقدار ۰/۲ را قرار می‌دهیم:

$V_{CE} = ۸/۳ - ۰/۶\,i_C \Rightarrow ۰/۲ = ۸/۳ - ۰/۶\,i_C \Rightarrow i_C(sat) = \frac{۸/۱}{۰/۶} = ۱۳/۵\,mA$

در حالت اشباع خروجی عبارتست از:

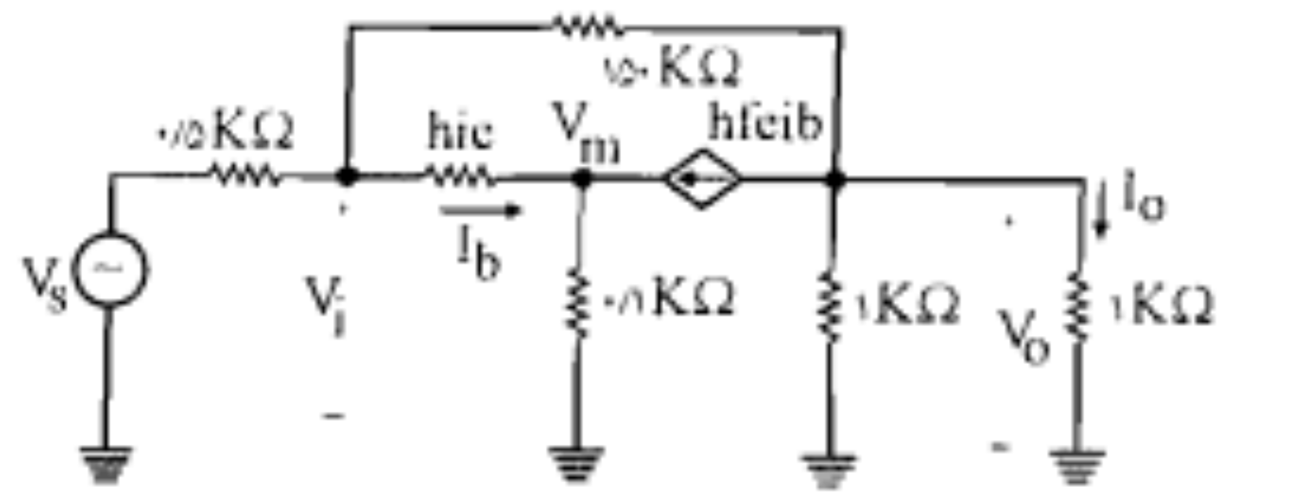
$V_o = ۰/۲ + ۰/۱\,i_C(sat)$

$V_o = ۰/۲ + ۰/۱\times ۱۳/۵ = ۱/۵۵\,V$

حداکثر انحراف بدون اعوجاج از بالا $\Rightarrow V_O = V_O$ (قطع) $- V_O$ (نقطه‌کار) $= ۸/۳ - ۵/۹۳ = ۲/۳۷\,V$

حداکثر انحراف بدون اعوجاج از بالا $\Rightarrow V_O = V_O$ (اشباع) $- V_O$ (نقطه‌کار) $= ۱/۵۵ - ۵/۹۳ = -۴/۳۸\,V$

د) مدار معادل ac به صورت زیر خواهد بود.



$$h_{ie} = \frac{h_{fe}\,V_T}{I_C} = \frac{۲۶\times ۱۵۰}{۴/۷۴} = ۸۲۳\Omega$$

برای به دست آوردن مقادیر خواسته شده بند (ج) باید مدار معادل ac را تحلیل نمود که با استفاده از قواعد مداری نظیر روش تحلیل گره می‌توان ولتاژ گره‌ها را محاسبه نمود و سپس تمامی مقادیر دیگر را به دست آورد.

$$۱۰^{-۳}\times\begin{bmatrix} \frac{۱}{۰/۵}+\frac{۱}{۱۵۰}+\frac{۱}{۰/۸۲۳} & -\frac{۱}{۰/۸۲۳} & -\frac{۱}{۱۵۰} \\ -\frac{۱}{۰/۸۲۳} & \frac{۱}{۰/۸۲۳}+\frac{۱}{۰/۱} & ۰ \\ -\frac{۱}{۱۵۰} & ۰ & ۲+\frac{۱}{۱۵۰} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_i \\ V_m \\ V_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_s}{۰/۵} \\ ۱۵۰\,i_b \\ -۱۵۰\,i_b \end{bmatrix}$$

$$i_b = \frac{V_i - V_m}{۰/۸۲۳}$$

با حل معادله فوق داریم:

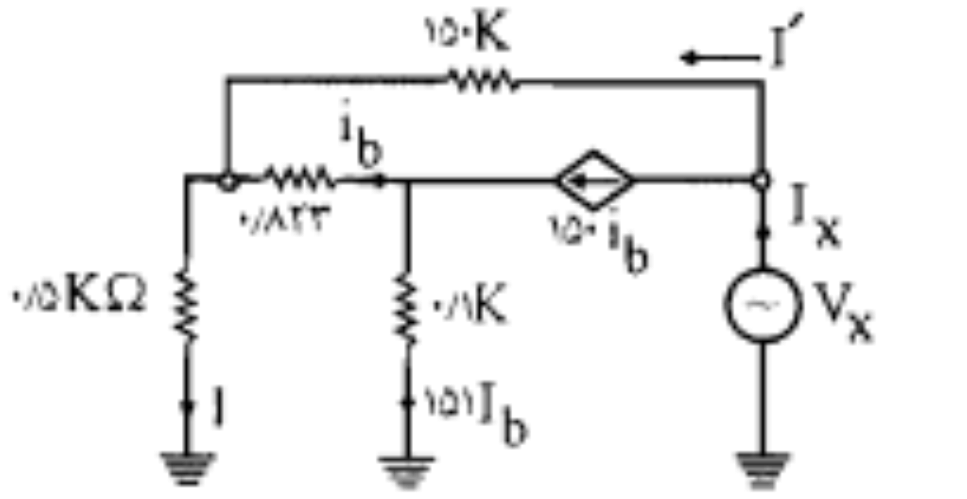
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -۴/۷$$

$$I_i = \frac{V_s - V_i}{۰/۵K\Omega}\ ,\quad I_O = \frac{V_O}{۱K\Omega}$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = -۴۶/۷ \qquad R_i = \frac{V_i}{I_i} \cong ۱۰\,K\Omega$$

$$A_{Vs} = A_V\cdot\frac{R_i}{R_i + R_s} = -۴/۷\times\frac{۱۰K}{۱۰K + ۰/۵K} = -۴/۴۷$$

برای محاسبه R_o یک منبع فرضی V_x در خروجی قرار می‌دهیم و V_s را اتصال کوتاه می‌کنیم بنابراین خواهیم داشت:



$$R'_O = \frac{V_x}{I_x}\ ,\quad R_O = R'_O \parallel ۱K \parallel ۱K$$

www.PnuEB.com

ابتدا یک KCL در حلقه، V_x ، ۱۵۰K و ۰/۵K می‌زنیم:

$$\begin{cases} I' = I_x - 150 I_b \\ I = I_x - 150 I_b - I_b \end{cases}$$

$$-V_x + 150 I' + 0/5 I = 0 \Rightarrow V_x = 150 (I_x - 150 I_b) + 0/5 (I_x - 151 I_b)$$

$$\Rightarrow \boxed{V_x = 15/05 I_x - 225/5 I_b} \quad (1)$$

KVL در حلقه ۰/۵K ، ۰/۸۲۳K و ۰/۱K می‌زنیم

$$-0/5 I + 0/823 I_b + 0/1 \times 151 I_b = 0$$

$$-0/5 (I_x - 151 I_b) + 15/92 I_b = 0 \quad \Rightarrow \boxed{I_b = \frac{0/5}{91/42} I_x} \quad (2)$$

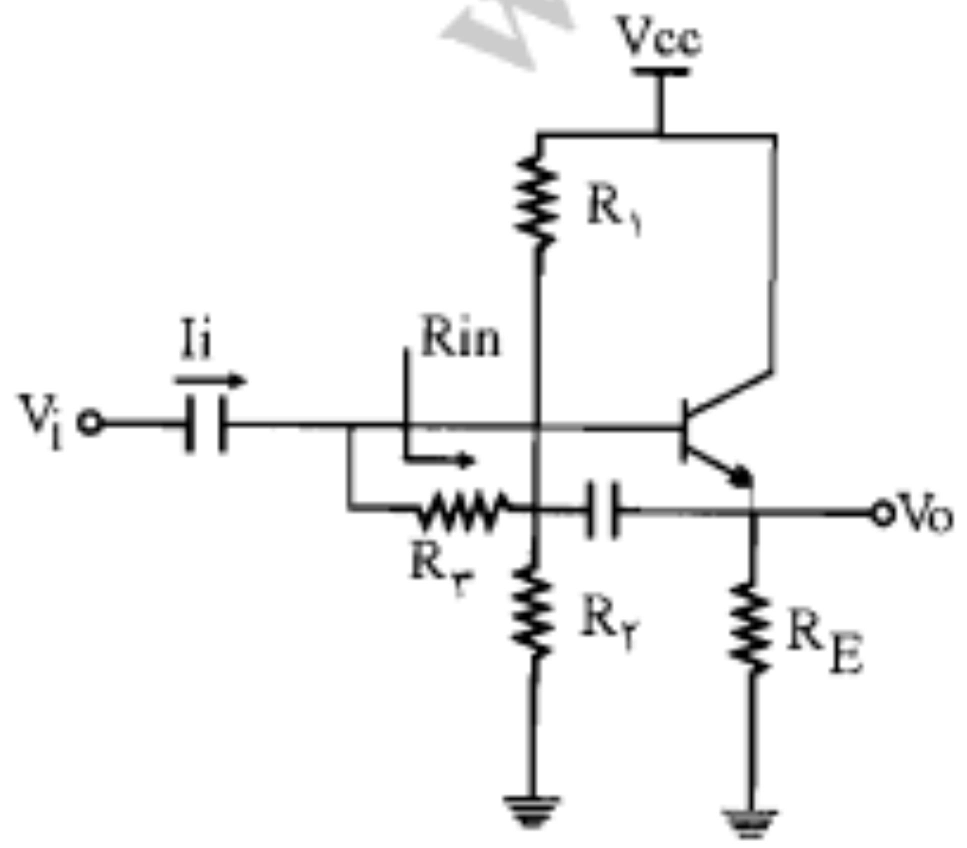
از رابطه (۲) و (۱) خواهیم داشت:

$$V_x = 150/5 I_x - \frac{225/5 \times 0/5}{91/42} I_x \Rightarrow \boxed{\frac{V_x}{I_x} = 149 K\Omega = R_o'}$$

$$\boxed{R_o = R_o' \parallel 1K \parallel 1K = 0/498 \Omega}$$

۱۴ ـ یک مدار بافر با مشخصات $A_V > 0/99$ و $R_i > 2 M\Omega$ ، با استفاده از روش بوت استرپ به نحوی طراحی کنید که مدار دارای پایداری مطلوب نسبت به تغییرات β بوده و دامنه نوسان متقارن خروجی آن حداکثر باشد. با فرض $100 < h_{fe} < 150$ و $V_{CC} = 15V$.

☑ **راه حل:**



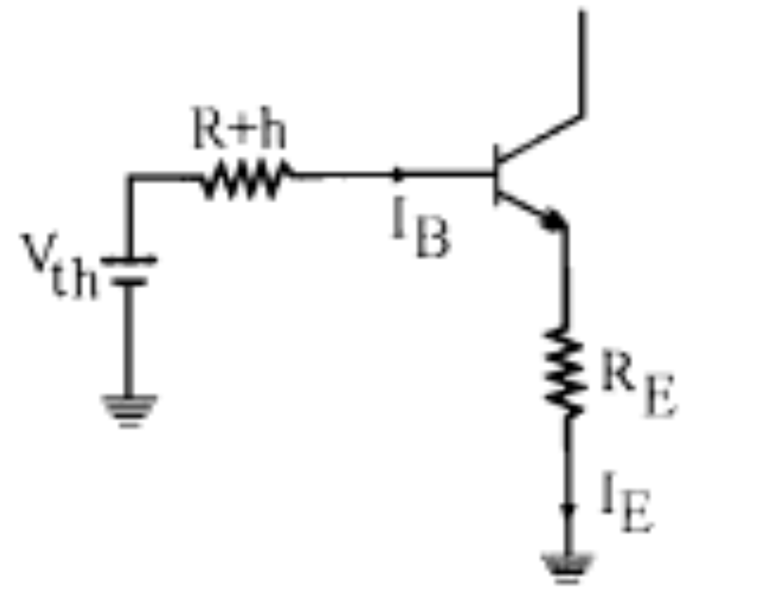
طرح کلی مدار بوت استرپ به صورت مدار مقابل می‌باشد. داریم که:

$$R_{eff} = \frac{V_i}{I_{R_3}} = \frac{V_i}{\frac{V_i - V_o}{R_3}} = \frac{R_3}{1 - A_V}$$

$$R_i = R_{eff} \parallel R_{in} = R_{eff} \parallel (h_{ie} + [1 + h_{fe}] R_E) > 2 M\Omega$$

با استفاده از مدار معادل تونن داریم:

$$V_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad , \quad R_{th} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



$$\Rightarrow R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E\right) I_C \cong V_{th} - V_{BE}$$

اگر بخواهیم دارای پایداری نسبی نسبت به β وجود داشته باشد باید:

$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} = 0/1 R_E$$

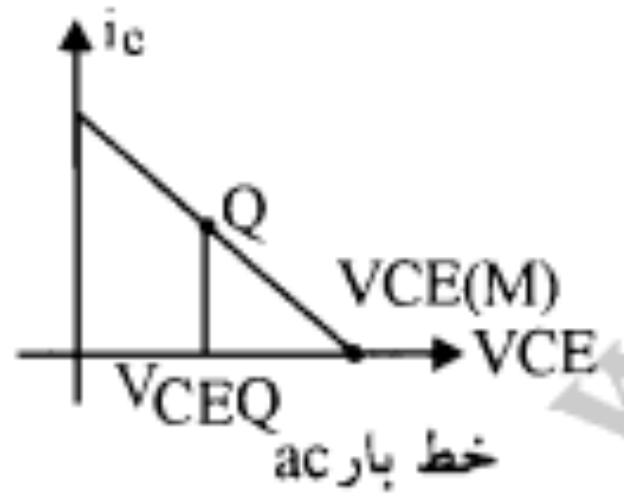
بنابراین خواهیم داشت:

$$R_{th} = 0/1 \times 100 R_E = 10 R_E \quad (1)$$

$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{1/1 R_E} \quad (2)$$

اگر خط بار ac را بکشیم و با صرفنظر از اشباع نقطه کار وسط خط بار ac باشد داریم:

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CE}(M)}{2}$$



$$V_{CE}(M) \cong V_{CC}$$

$$V_{CEQ} = \frac{15}{2} = 7/5 V$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ}$$

$$I_{CQ} R_E = 7/5 V \quad (3)$$

از رابطه (۲) داریم:

$$V_{th} - 0/7 = 1/1 \times 7/5 \Rightarrow V_{th} = 8/95 V$$

در تقویت‌کننده کلکتور مشترک داریم:

$$A_V = \frac{(1 + h_{fe}) R_E}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

اگر به جای h_{fe} مقدار متوسط β را قرار دهیم $h_{fe} = \frac{250}{2} = 125$ خواهیم داشت:

$$A_V = \frac{126 R_E}{h_{ie} + 126 R_E} \quad , \quad I_C = \frac{h_{fe} V_T}{h_{ie}} = \frac{8/95 - 0/7}{1/1 R_E} \Rightarrow h_{ie} = 0/43 R_E$$

$$A_V = \frac{126 R_E}{0/43 R_E + 126 R_E} = 0/996$$

www.PnuEB.com

بنابراین خواهیم داشت:

$$R_{in} = h_{ie}(min) + \left[۱ + h_{fe}(min)\right] R_E > ۲M\Omega$$

$$\frac{h_{fe}(min).V_T}{I_{CQ}} + \left[۱ + h_{fe}(min)\right] R_E > ۲M\Omega \qquad (۴)$$

از رابطه (۴) و (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{۱۰۰ \times ۲۶ \times ۱۰^{-۳}}{I_{CQ}} + \frac{(۱+۱۰۰)۷/۵}{I_{CQ}} > ۲۰۰۰ \times ۱۰^{۳}$$

و خواهیم داشت:

$$\boxed{I_{CQ} < ۰/۳۸mA}$$

$$\frac{۷/۵}{R_E} < ۰/۳۸\, mA \Rightarrow \boxed{R_E > ۱۹/۷۴\ K\Omega}$$

اگر $R_E = ۲۲K\Omega$ باشد.

$$I_{CQ} = \frac{۷/۵}{۲۲} = ۰/۳۴\ mA$$

$$R_{in} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶ \times ۱۰^{-۳}}{۰/۳۴} + ۱۰۱ \times ۲۰ = ۲/۲۲\ M\Omega$$

$$\frac{۱}{R_{eff}} = \frac{۱}{۲} - \frac{۱}{۲/۲۲} = ۱۹\ M\Omega$$

$$R_{eff} = \frac{R_۳}{۱ - A_V} \Rightarrow R_۳ = (۱ - A_V) \times R_{eff} = ۷۸K\Omega$$

$$R_{th} = ۱۰R_E = ۲۲۰\ K\Omega = R_۳ + \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} \Rightarrow \boxed{\frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۴۲\ K\Omega} \qquad (۵)$$

$$V_{th} = V_{CC}\cdot\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} \Rightarrow \frac{R_1}{R_۱+R_۲} = \frac{۸/۹۵}{۱۵} = ۰/۵۹۶ \qquad (۶)$$

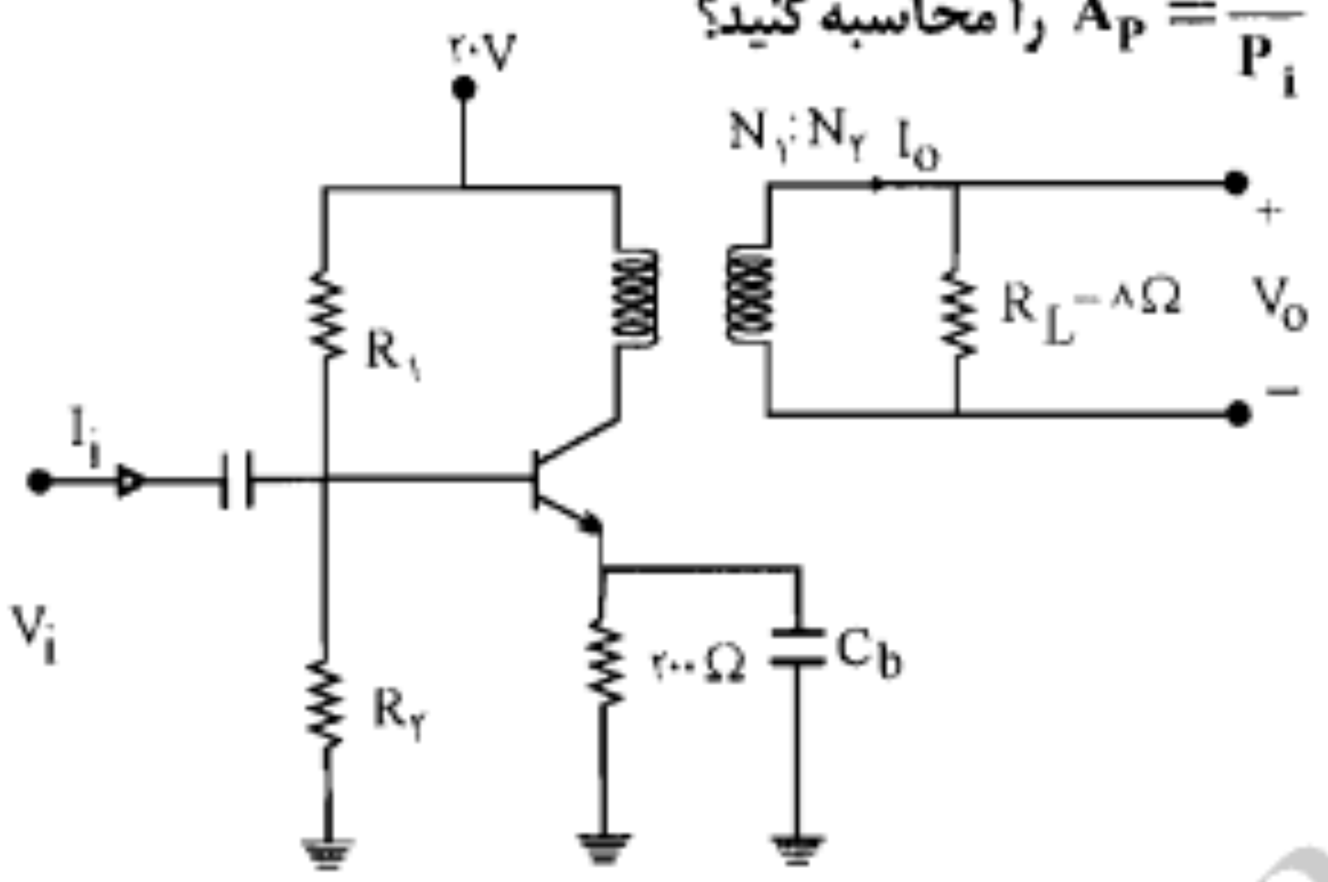
(۵) و (۶) $\Rightarrow R_۱ \times ۰/۵۹۶ = ۱۴۲\ K\Omega \Rightarrow \boxed{R_۱ = ۲۳۸/۲۵\ K\Omega}$

$$\frac{R_۲}{۲۳۸/۲۵ + R_۲} = ۰/۵۹۶ \Rightarrow \boxed{R_۲ = ۳۵۱/۵\ K\Omega}$$

۱۵ـ تقویت‌کننده شکل م ـ ۱۵ که بنام تقویت‌کننده کلاس A با کوپلاژ ترانسفورماتوری معروف است را در نظر بگیرید. با فرض $h_{fe} = ۵۰$، ترانسفورماتور ایده‌آل با مقاومت اهمی صفر و $\frac{N_۱}{N_۲} = ۵$.

الف) مقادیر $R_۱$ و $R_۲$ را طوری تعیین کنید که نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد و در وسط خط بار ac قرار گیرد.

ب) کمیت‌های A_I، A_V و $A_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i}$ را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۱۵

راه حل:

مدار معادل تونن را در ورودی می‌یابیم:

$$\begin{cases} V_{th} = V_{CC}\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۲۰\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} \\ R_{th} = R_۱ \parallel R_۲ = \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} \end{cases}$$

و برای اینکه نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید رابطه زیر را داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} \le ۰/۱R_E \Rightarrow R_{th} = ۰/۱\beta R_E = ۰/۱ \times ۵۰ \times ۰/۲ = ۱K\Omega$$

$$KVL: R_{th}.I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow R_{th} I_B + R_E(۱+\beta) I_B = V_{th} - ۰/۷$$

$$\Rightarrow \frac{I_C}{\beta}\left[R_{th} + R_E(۱+\beta)\right] = V_{th} - ۰/۷ \Rightarrow I_C \left[\frac{R_{th}}{\beta} + \frac{R_E(۱+\beta)}{\beta}\right] = V_{th} - ۰/۷ \quad (1)$$

و برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد باید داشته باشیم:

از $V_{CE}(sat)$ صرفنظر می‌کنیم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CE}(sat)}{R_{dc} + R_{ac}}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{dc}}$$

$$\begin{cases} R_{dc} = ۰/۲K\Omega \\ R_{ac} = ۸\Omega \times \left(\frac{N_۱}{N_۲}\right)^۲ = ۹ \times ۲۵ = ۲۰۰\ \Omega \end{cases}$$

www.PnuEB.*com

R_{ac}: مقاومت انتقال یافته ۸Ω به اولیه ترانس می‌باشد.

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{۲۰}{۰/۲ + ۲۰} = ۵۰\ mA$$

این مقدار به دست آمده را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

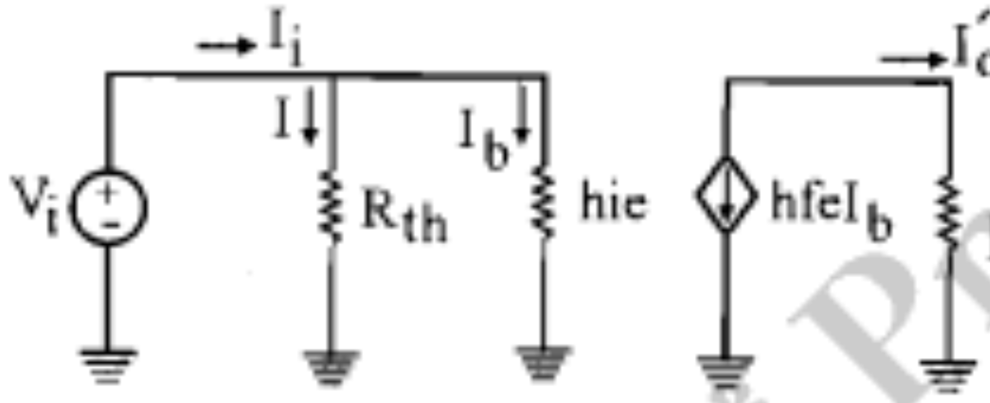
$$۵۰\,mA\left[\frac{۱}{۵۰} + ۰/۲ \times \frac{۵۱}{۵۰}\right] = V_{th} - ۰/۷ \Rightarrow V_{th} = ۱۱/۹\ V$$

$$\begin{cases} V_{th} = ۲۰\dfrac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۱/۹ \Rightarrow \dfrac{R_۲}{R_۱+R_۲} = \dfrac{۱۱/۹}{۲} \\ R_{th} = \dfrac{R_۱ R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱K\Omega \Rightarrow R_۱ \times \dfrac{۱۱/۹}{۲۰} = ۱ \Rightarrow R_۱ = \dfrac{۲۰}{۱۱/۹} = ۱/۷\ K\Omega \end{cases}$$

$$R_۲ = \frac{R_۱ R_{th}}{R_۱ - R_{th}} = ۲/۴۳\ K\Omega$$

$$I_{CQ} = ۵۰\,mA \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{۵۰ \times ۲۶}{۵۰} = ۲۶\Omega$$

ب) مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$R_L \times \left(\frac{N_۱}{N_۲}\right)^۲ = ۲۰۰\ \Omega$$

I'_o: جریان خروجی در اولیه ترانس می‌باشد.

$$A'_I = \frac{I'_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + I} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_{th}}} = \frac{-h_{fe}}{۱ + \frac{h_{ie}}{R_{th}}} = \frac{-۵۰}{۱ + \frac{۲۶}{۱K\Omega}} = \frac{-۵۰}{۱ + \frac{۲۶}{۱K\Omega}} = \frac{-۵۰}{۱ + \frac{۲۶}{۱۰۰۰}} = -۴۸/۷$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{I'_O} \times \frac{I'_O}{I_i} = \frac{N_۱}{N_۲} \times A'_I = ۵ \times -۴۸/۷ = -۲۴۳/۵$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_{th}}} = \frac{h_{ie}}{۱ + \frac{h_{ie}}{R_{th}}} = \frac{۲۶ \times ۱۰^{-۳}}{۱ + \frac{۲۶ \times ۱۰^{-۳}}{۱}} = ۲۵/۳\ \Omega$$

$$A'_V = A'_I = A'_I \times \frac{R'_L}{R_i} = -۴۸/۷ \times \frac{۲۰۰}{۲۵/۳} = -۳۸۵$$

$$A_V = \frac{N_۲}{N_۱} \times A'_V = \frac{۱}{۵} \times -۳۸۵ = -۷۷$$

$$A_P = A_V \times A_I = (-۷۷) \times (-۲۴۳/۵) = ۱۸۷۵۰$$

از رابطه به دست آمده برای h_{ie} داریم:

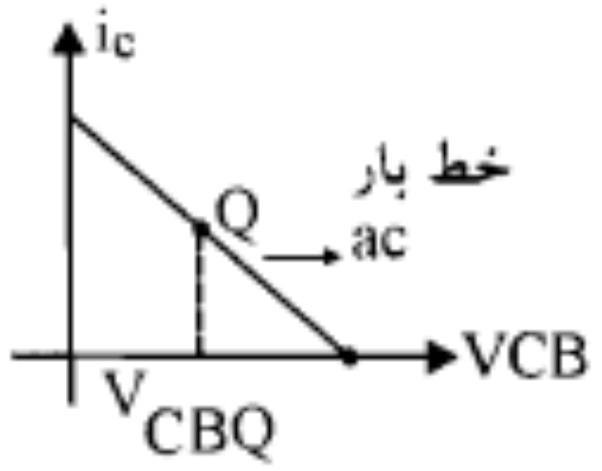
$$h_{ie} = \frac{۲۶ \times ۱۰^{-۳}(R_{th} + ۰/۵۵)}{(V_{th} - ۰/۷)} \Rightarrow \frac{۱}{۳۰}K\Omega = ۲۶ \times ۱۰^{-۳}\left(\frac{۵۵ \times ۱۰^{-۳} + ۰/۵۵}{V_{th} - ۰/۷}\right)$$

$$\Rightarrow V_{th} - ۰/۷ = ۳۰ \times ۲۶ \times ۱۰^{-۳} \times (۰/۵۵ + ۵۵ \times ۱۰^{-۳}) \Rightarrow V_{th} = ۱/۱۷۲V$$

یکی دیگر از شرایط مطلوب تقویت‌کننده وسط بودن نقطه‌کار در وسط خط بار ac می‌باشد و این شرط را نیز بررسی می‌کنیم:

معادله خط بار ac: $V_{cb} = -R_{ac}\, i_C$ $\qquad R_{ac} = R_L$

$$\Rightarrow V_{CB} - V_{CBQ} = -R_L(i_C - I_{CQ})$$



$$\Rightarrow V_{CB}(A) = V_{CBQ} + R_L I_{CQ}$$

از V_{CB} (sat) صرفنظر می‌کنیم و برای اینکه نقطه‌کار در وسط خط بار ac باشد باید داشته باشیم:

$$V_{CBQ} = \frac{V_{CB}(A)}{۲} = \frac{V_{CBQ} R_L I_{CQ}}{۲} \Rightarrow V_{CBQ} = R_L I_{CQ}$$

در خط بار dc داریم: $V_{CBQ} = V_{CC} - R_L I_{CQ} - V_{th} - R_{th} I_{BQ} \Rightarrow$

$$۲R_L I_{CQ} + \frac{R_{th}}{\beta} I_{CQ} = V_{CC} - V_{th} \Rightarrow ۲۰\, I_{CQ} + \frac{۵۵ \times ۱۰^{-۳}}{۱۰} I_{CQ} = V_{CC} - ۱/۱۷۲$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC} - ۱/۱۷۲}{۲۰/۰۰۵۵} \qquad (IV)$$

و طبق رابطه به دست آمده برای I_B داریم:

$$I_{BQ} = \frac{V_{th} - ۰/۷}{R_{th} + ۰/۰۵ \times ۱۱} = \frac{V_{th} - ۰/۷}{R_{th} + ۰/۵۵}$$

$$\Rightarrow I_{BQ} = \frac{۱/۱۷۲ - ۰/۷}{۵۵ \times ۱۰^{-۳} + ۰/۵۵} = ۰/۷۸\ mA \Rightarrow I_{CQ} = ۱۰ \times I_{BQ} = ۱۰ \times ۰/۷۸ = ۷/۸mA$$

این مقدار به دست آمده را در رابطه (IV) قرار می‌دهیم:

$$۷/۸mA = \frac{V_{CC} - ۱/۱۷۲}{۲۰/۰۰۵۵} \Rightarrow V_{CC} = ۱۵۷/۲\ V$$

www.PnuEB*.com

$$\begin{cases} V_{th} = V_{CC}\frac{R_1}{R_1+R_2} = 157.2\times\frac{R_1}{R_1+R_2} \\ R_{th} = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = 55\times10^{-3} \end{cases}$$

این دو رابطه را بر هم تقسیم می‌کنیم ⇐

$$\frac{55\times10^{-3}}{1.172} = \frac{R_2}{157.2} \Rightarrow R_2 = 7.38\,K\Omega$$

رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$V_O = h_{Oe}^{-1}\left(-h_{fe}I_b - \frac{V_O}{10}\right) - h_{ie}I_b$$

$$\Rightarrow V_O = 10\left(-h_{fe}I_b - \frac{V_O}{10}\right) - h_{ie}I_b \Rightarrow 2V_O = -10h_{fe}I_b - h_{ie}I_b$$

$$\Rightarrow 2V_O = -I_b(10h_{fe}+h_{ie}) \Rightarrow I_b = \frac{-2V_O}{10h_{fe}+h_{ie}} \quad (III)$$

در حلقه R_s و V_s و h_{ie} نیز KVL می‌زنیم:

$$KVL: V_s = R_sI_1 - h_{ie}I_b = 50\times10^{-3}(-I - I_b - h_{fe}I_b) - h_{ie}I_b$$

در این رابطه به جای I مقدار به دست آمده از رابطه (II) را قرار می‌دهیم.

$$= 50\times10^{-3}\left(h_{fe}I_b + \frac{V_O}{10} - I_b - h_{fe}I_b\right) - h_{ie}I_b$$

$$\Rightarrow V_s = 0.05\left(\frac{V_o}{10} - I_b\right) - h_{ie}I_b$$

و به جای I_b مقدار به دست آمده از رابطه (III) را قرار می‌دهیم:

$$V_s = 0.05\left(\frac{V_O}{10} + \frac{2V_O}{10h_{fe}+h_{ie}}\right) + h_{ie}\times\frac{2V_O}{(10h_{fe}+h_{ie})}$$

$$\Rightarrow V_s = V_O\left(0.005 + \frac{2(h_{ie}+0.051)}{100+h_{ie}}\right)$$

$$\Rightarrow A_{vs} = \frac{V_\circ}{V_s} = \frac{100+h_{ie}}{0.5+0.005h_{ie}+2h_{ie}+0.1} = \frac{100+h_{ie}}{2.005h_{ie}+0.6}$$

برای اینکه A_{vs} حداکثر شود باید در رابطه بالا h_{ie} مینیمم شود و کمترین مقدار h_{ie} صفر می‌باشد که در این صورت:

$$h_{ie} = 0 \Rightarrow A_{vs} = \frac{100+0}{2.005\times0+0.6} = \frac{100}{0.6} = 167$$

اما از نظر عملی h_{ie} نمی‌تواند صفر باشد (برای اینکه h_{ie} صفر باشد I_C باید خیلی بزرگ باشد) بنابراین A_{sv} ماکزیمم ۹۰٪ این ماکزیمم مقدار به دست آمده در نظر گرفته می‌شود در نتیجه داریم:

$$\%90\times167 = \frac{100+h_{ie}}{2.005h_{ie}+0.6} \Rightarrow h_{ie} = \frac{100-90}{2.005\times150-1} = \frac{1}{30}\,K\Omega$$

یکی دیگر از شرایط مورد نیاز پایداری مطلوب نسبت به β می‌باشد:

$$KVL: R_{th}I_B + R_sI_E = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow R_{th}\frac{I_C}{\beta} + R_sI_C\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right) = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow \frac{R_{th}}{10}I_C + R_s\times\frac{11}{10}I_C = V_{th} - 0.7$$

و برای اینکه پایداری نسبت به تغییرات β باید داشته باشیم:

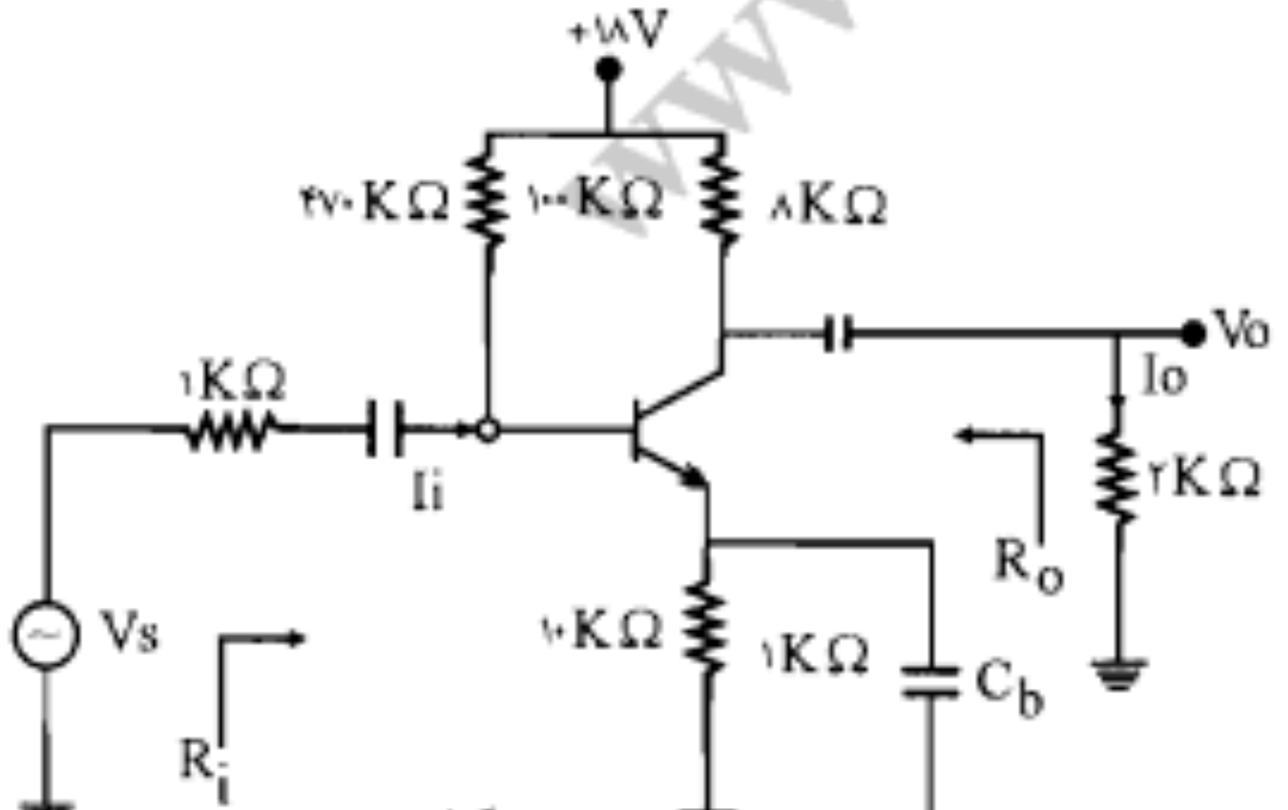
$$\frac{R_{th}}{10} = 0.1R_s\times\frac{11}{10} \Rightarrow R_{th} = 1.1R_s = 1.1\times50\,\Omega = 55\Omega$$

$$V_{th} = V_{CC}\frac{R_1}{R_1+R_2} \Rightarrow R_1 = 55.4$$

(۱۷)ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۱۷ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 20$ ، $h_{re} = h_{oe} \cong 0$ است.

الف) کمیت‌های A_I ، R_i ، R_O و A_{Vs} را محاسبه کنید؟

ب) اگر خازن کنارگذر C_b را برداریم مقادیر جدید R_i و R_O چقدر خواهند بود؟



شکل م ـ ۱۷

☑ **راه حل:**

الف)

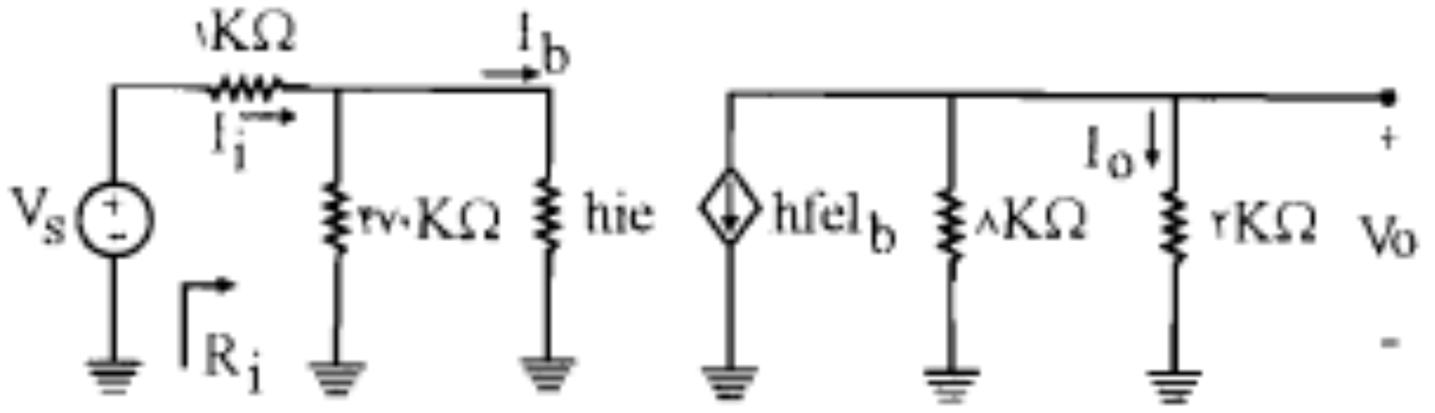
$$KVL: 470\,I_B + 1\times I_E = V_{CC} - V_{BE} = 18 - 0.7 = 17.3$$

$$\Rightarrow 470\times I_B + (1+\beta)I_B = 17.3 \Rightarrow I_B = \frac{17.3}{470+(1+20)} = 0.035\,mA$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = 20\times0.035 = 0.705\,mA \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe}V_T}{I_C} = \frac{20\times26}{0.705} = 0.737\,K\Omega$$

www.PnuEB.com

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



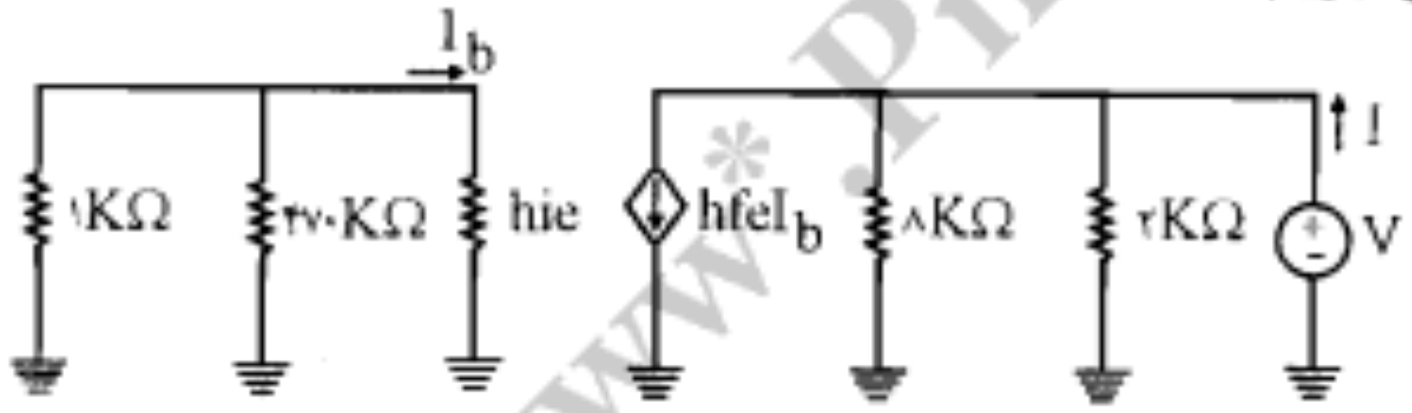
$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{۸K\Omega}{۸+۲}}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{۴۷۰}} = \frac{۰/۸ \times -۲۰}{۱ + \frac{۰/۷۳۷}{۴۷۰}} = -۱۶$$

$$R_i = ۴۷۰K\Omega \parallel h_{ie} = ۴۷۰K\Omega \parallel ۰/۷۳۷ = ۰/۷۳۵\,K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۱۶ \times \frac{۲}{۰/۷۳۵} = -۴۳/۵$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۴۳/۵ \times \frac{۰/۷۳۵}{۰/۷۳۵ + ۱K\Omega} = -۱۸/۴۳$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی R_O یک منبع ولتاژ را موازی مقاومت ۸KΩ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می‌گیریم:

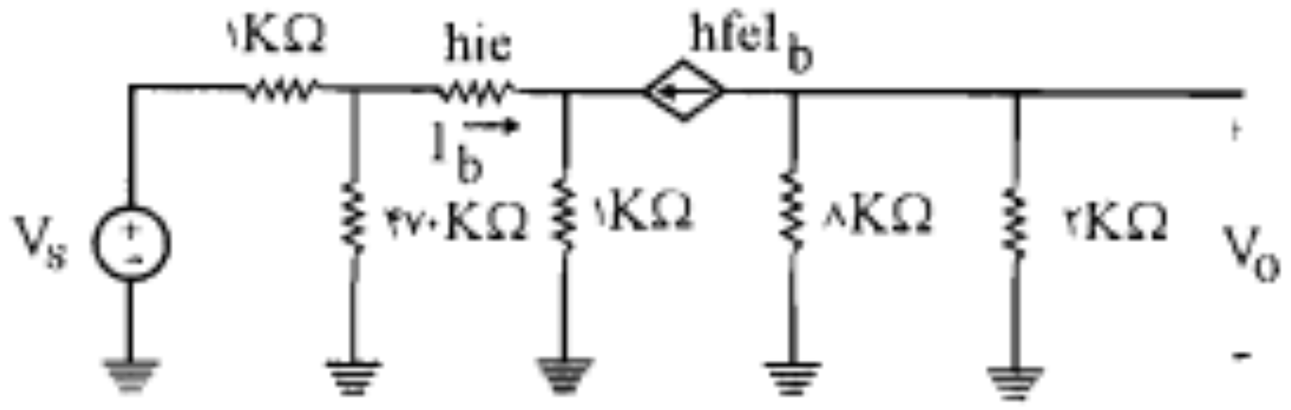


$$I = \frac{V}{۲} + \frac{V}{۸} + h_{fe} I_b$$

و چون در حلقه ورودی هیچ منبع ولتاژی وجود ندارد پس $I_b = ۰$ می‌باشد:

$$\Rightarrow I = \frac{V}{۲} + \frac{V}{۸} = V(\frac{۱۰}{۱۶}) \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱۶}{۱۰} = ۱/۶\ K\Omega$$

ب) در این صورت مدار معادل ac به صورت زیر در می‌آید:

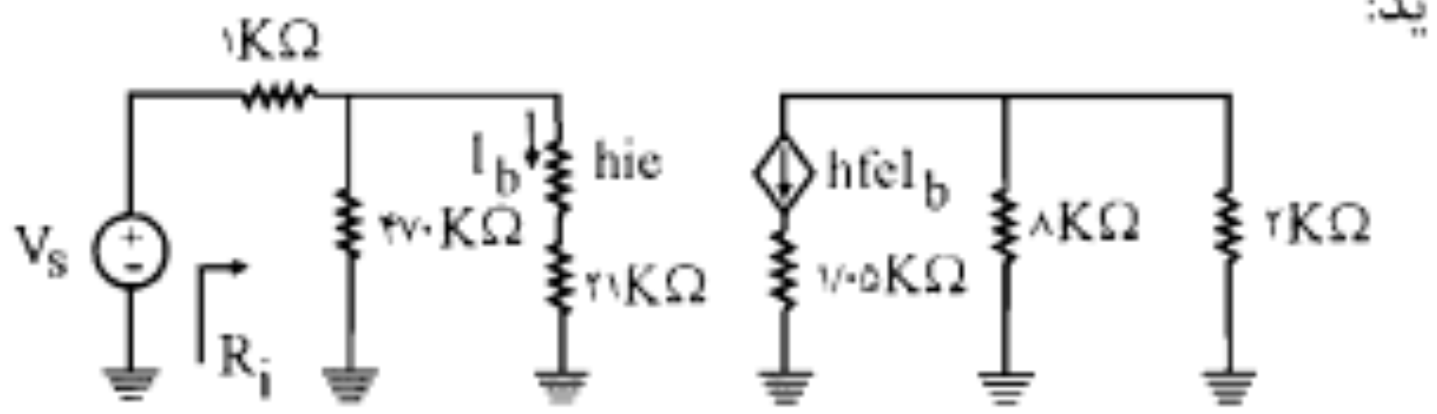


با استفاده از دوگان قضیه میلر داریم:

$$K' = \frac{I_۲}{I_۱} = \frac{h_{fe} I_b}{I_b} = h_{fe} = ۲۰$$

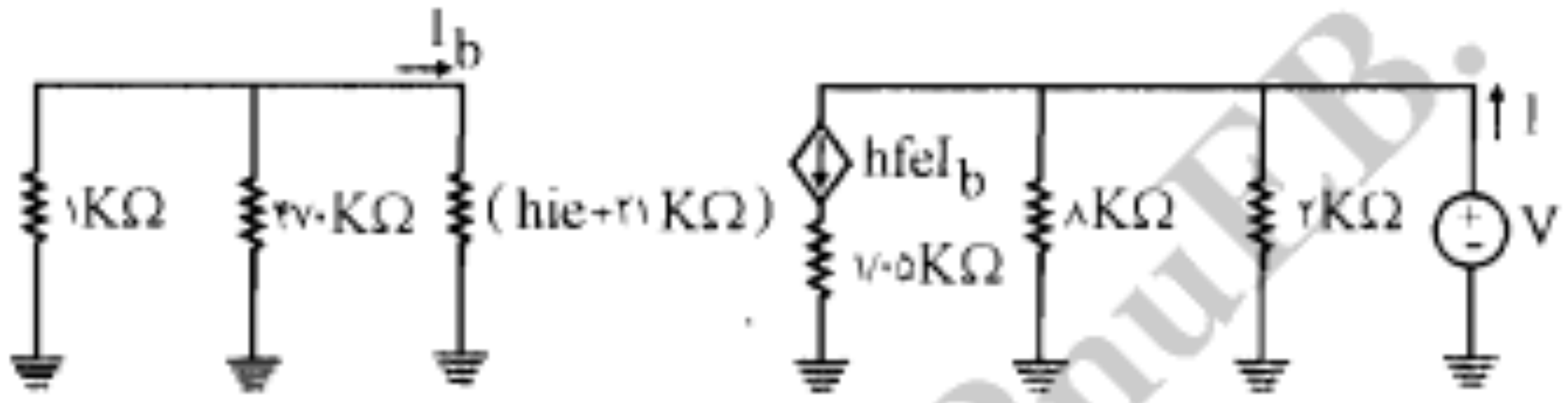
$$\begin{cases} R'_۱ = (۱ + K')R' = ۲۱ \times ۱K\Omega = ۲۱K\Omega \\ R'_۲ = (\frac{K' + ۱}{K'})R' = ۰/۵K\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر در می‌آید:



$$R_i = ۴۷۰K\Omega \parallel (h_{ie} + R'_۱) = ۴۷۰ \parallel (۰/۷۳۷ + ۲۱) = ۲۰/۷۷K\Omega$$

و برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را موازی مقاومت ۸KΩ قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر قرار می‌دهیم.

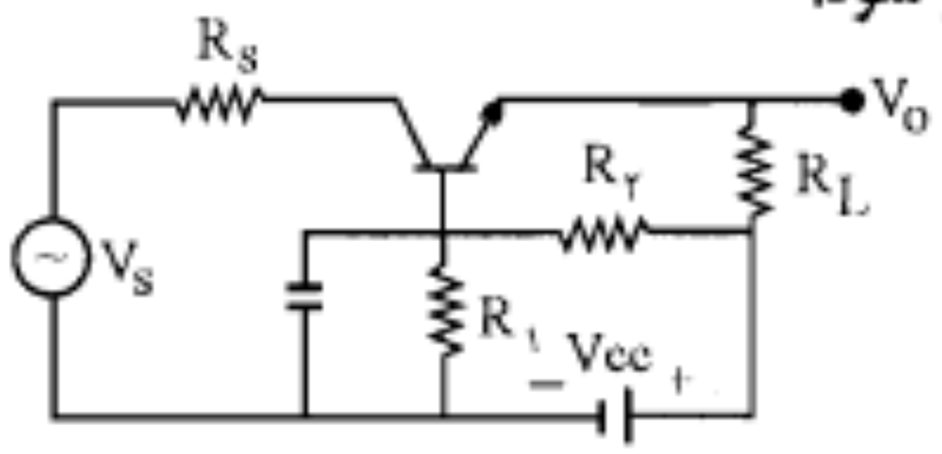


$$I = \frac{V}{۸} + ۲۰ I_b + \frac{V}{۲}$$

و چون در حلقه ورودی منبع ولتاژ نداریم پس I_b صفر می‌باشد.

$$I = \frac{V}{۸} + \frac{V}{۲} = V(\frac{۱۰}{۱۶}) \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = ۱/۶\,K\Omega$$

۱۶ ـ در مدار شکل م ـ ۱۶، $h_{fe} = ۱۰$، $h_{re} = ۰$، $h_{oe}^{-1} = ۱۰\,K\Omega$، $R_1 = ۱۰\,Ka$ و $R_s = ۵۰\,\Omega$ است. $R_۱$، $R_۲$ و V_{CC} را چنان تعیین کنید که A_{vs} حداکثر شود؟



شکل م ـ ۱۶

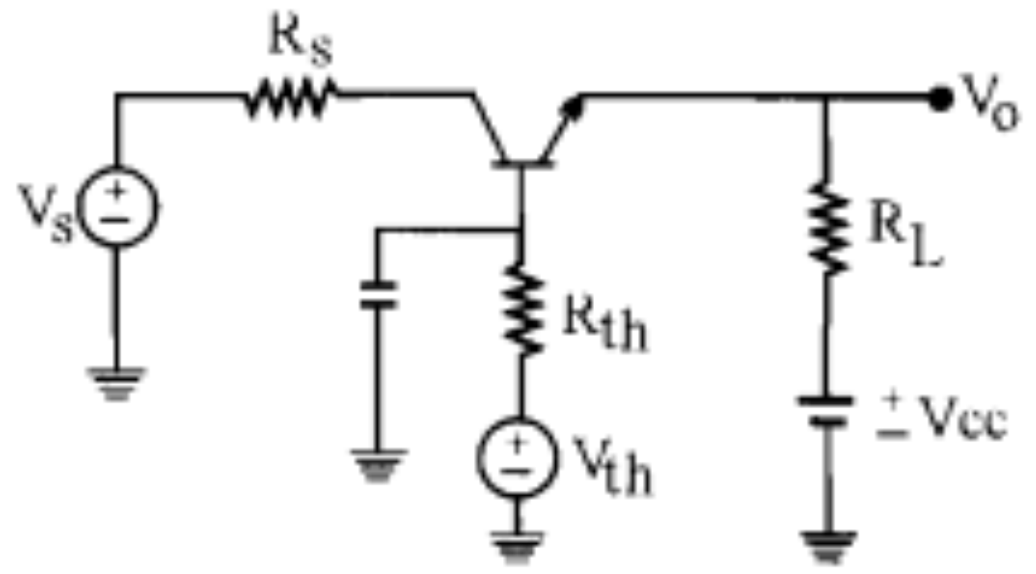
☑ **راه حل:**

مدار معادل تونن بین بیس و زمین را می‌یابیم:

$$\begin{cases} R_{th} = R_۱ \parallel R_۲ = \frac{R_۱ R_۲}{R_۱ + R_۲} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_۱}{R_۱ + R_۲} \end{cases}$$

www.PnuEB.com

در تحلیل dc منبع V_s زمین می‌شود پس در KVL در حلقه V_{th} و R_{th} و R_s و V_{BE} داریم:



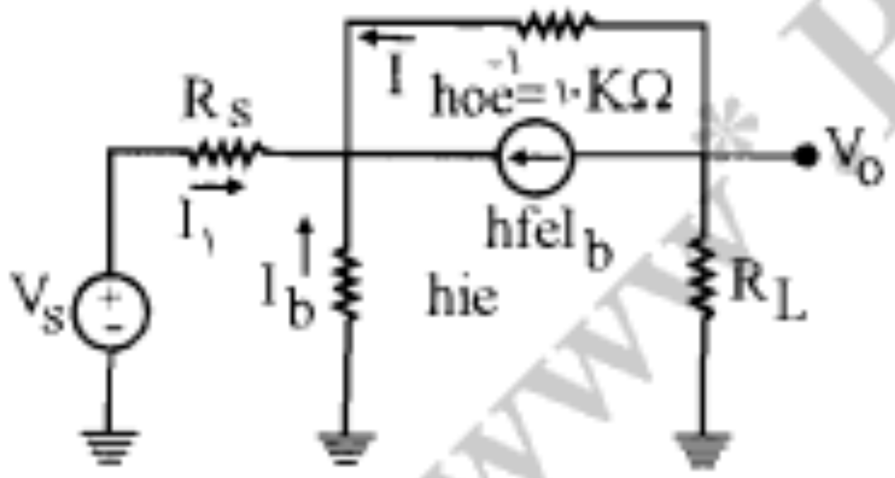
$$KVL: R_{th} I_B + R_S I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th} I_B + 50\times 10^{-3}(1+\beta) I_B = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_B = \frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.05\times(1+10)} \quad (A)$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \times \left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + (0.05\times 11)}\right) = 10\times\left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + (0.05\times 11)}\right) \quad (B)$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{10\times V_T}{10\times\left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.55}\right)} = \frac{V_T}{\left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.55}\right)} = \frac{26\times 10^{-3}\times(R_{th} + 0.55)}{(V_{th} - 0.7)}$$

مدار معادل ac: در حلقه h_{oe}^{-1} و h_{ie} و R_L، KVL می‌زنیم:



$$KVL: V_O = h_{oe}^{-1} I - h_{ie} I_b \quad (I)$$

$$KCL: I = -h_{fe} I_b - \frac{V_o}{R_L}$$

$$\Rightarrow I = -h_{fe} I_b - \frac{V_O}{10} \quad (II)$$

با جایگذاری رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$V_o = 10\left(-h_{fe} I_b - \frac{V_o}{10}\right) - h_{ie} I_b \Rightarrow 2V_o = -(10 h_{fe} + h_{ie}) I_b$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{-2V_o}{10 h_{fe} + h_{ie}} \quad (III)$$

در حلقه V_s و R_s و h_{ie}، KVL می‌زنیم: $V_s = R_s I_1 - h_{ie} I_b = R_s(-I - I_b - h_{fe} I_b) - h_{ie} I_b$

در رابطه بالا به جای I مقدار به دست آمده از رابطه (II) را قرار می‌دهیم:

$$\Rightarrow V_s = 50\times 10^{-3}\left(h_{fe} I_b + \frac{V_o}{10} - I_b - h_{fe} I_b\right) - h_{ie} I_b$$

$$\Rightarrow V_s = 5\times 10^{-2}\times\frac{V_o}{10} - I_b(h_{ie} + 5\times 10^{-2})$$

مقدار I_b به دست آمده از رابطه (III) در رابطه بالا قرار می‌دهیم:

$$\Rightarrow V_s = 5\times 10^{-3} V_O + \frac{2V_O}{10 h_{fe} + h_{ie}}(h_{ie} + 5\times 10^{-2})$$

$$h_{fe} = 10 \Rightarrow V_s = V_O\left[5\times 10^{-3} + \frac{2(h_{ie} + 5\times 10^{-2})}{10\times 10 + h_{ie}}\right]$$

$$\Rightarrow A_{V_s} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{100 + h_{ie}}{0.5 + 2h_{ie} + 0.005 h_{ie} + 0.1} = \frac{100 + h_{ie}}{2.005 h_{ie} + 0.6}$$

برای اینکه A_{V_s} ماکزیمم شود، h_{ie} باید مینیمم باشد (مشتق A_{V_s} نسبت به h_{ie} منفی می‌باشد پس با افزایش h_{ie}، A_{V_s} کاهش می‌یابد)

$$h_{ie} = 0 \Rightarrow A_{V_{s\,(max)}} = \frac{100}{0.6} = \frac{500}{3}$$

اما از نظر عملی h_{ie} نمی‌تواند صفر باشد بنابراین A_{V_s}، ٪۹۰ این ماکزیمم مقدار در نظر گرفته می‌شود پس داریم:

$$\%90\times\frac{500}{3} = \frac{100 + h_{ie}}{2.005 h_{ie} + 0.6} \Rightarrow h_{ie} = \frac{1}{3} K\Omega$$

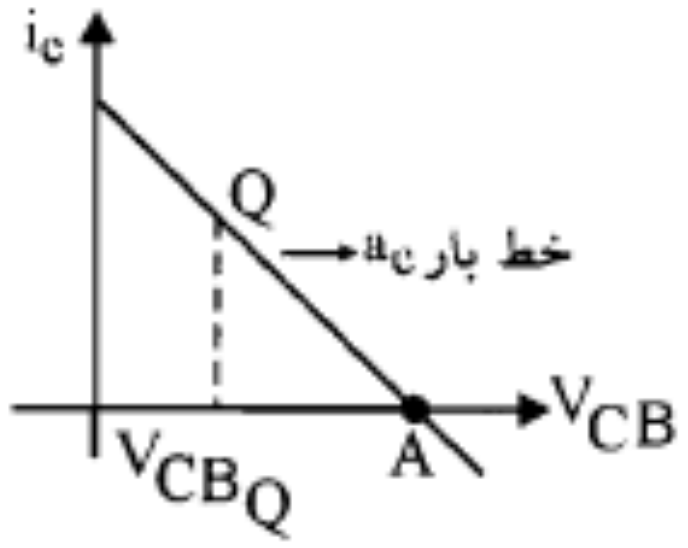
و همچنین پایداری نسبی و مطلوب نسبت به β یکی از شرایط مورد نیاز می‌باشد پس طبق رابطه زیر داریم: (KVL در حلقه V_{th} و R_{th} و R_s)

$$\frac{R_{th}}{\beta}\times I_C + R_S I_C\times\frac{1+\beta}{\beta} = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow \frac{R_{th}}{10} I_C + R_C\times\frac{11}{10} I_C = V_{th} - V_{BE}$$

برای اینکه پایداری نسبت به β داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{10} = 0.1 R_s\times\frac{11}{10} \Rightarrow R_{th} = 1.1 R_s = 1.1\times 50 = 55\Omega$$

طبق رابطه h_{ie} داریم: $\frac{1}{3} = 26\times 10^{-3}\left(\frac{55\times 10^{-3} + 0.55}{V_{th} - 0.7}\right) \Rightarrow V_{th} = 1.172V$



وسط بودن نقطه کار در خط بار ac یکی از شرایط مطلوب تقویت کننده است. حال این حالت را بررسی می‌کنیم.

$R_{ac} = R_L$ معادله خط بار ac $V_{cb} = -R_{ac} I_c$

$$V_{CB} - V_{CBQ} = -R_L(i_C - I_{CQ})$$

$$V_{CB(A)} = V_{CBQ} + R_L I_{CQ}$$

www.PnuEB.com

از V_{CB} (sat) صرفنظر می‌کنیم برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار باشد باید داشته باشیم:

$$V_{CBQ}=\frac{V_{CB}\,(A)}{۲}=\frac{V_{CBQ}+R_L I_{CQ}}{۲}$$

$$\Rightarrow V_{CBQ}=R_L I_{CQ}$$

خط بار dc: $V_{CBQ}=V_{CC}-R_L I_{CQ}-V_{th}-R_{th} I_{BQ}$

$$\Rightarrow ۲R_L I_{CQ}+\frac{R_{th}}{\beta} I_{CQ}=V_{CC}-V_{th}$$

$$\Rightarrow ۲۰ I_{CQ}+\frac{۵۵\times ۱۰^{-۳}}{۱۰} I_{CQ}=V_{CC}-۱/۱۷۲ \Rightarrow I_{CQ}(۲۰/۰۰۵۵)=V_{CC}-۱/۱۷۲ \; (C)$$

طبق رابطه (A) مقدار I_B به دست می‌آید:

$$I_{BQ}=\frac{۱/۱۷۲-۰/۷}{۵۵\times ۱۰^{-۳}+۰/۵۵}=۰/۷۸\,mA$$

(B) طبق رابطه $I_{CQ}=\beta I_{BQ}=۷/۸\,mA$

با جایگذاری این مقدار در رابطه (C) داریم:

$$۷/۸mA(۲۰/۰۰۵۵)=V_{CC}-۱/۱۷۲\Rightarrow V_{CC}=۱۵۷/۲\times\frac{R_۱}{R_۱+R_۲}$$

$$V_{th}=V_{CC}\times\frac{R_۱}{R_۱+R_۲}\Rightarrow ۱/۱۷۲=۱۵۷/۲\times\frac{R_۱}{R_۱+R_۲}$$

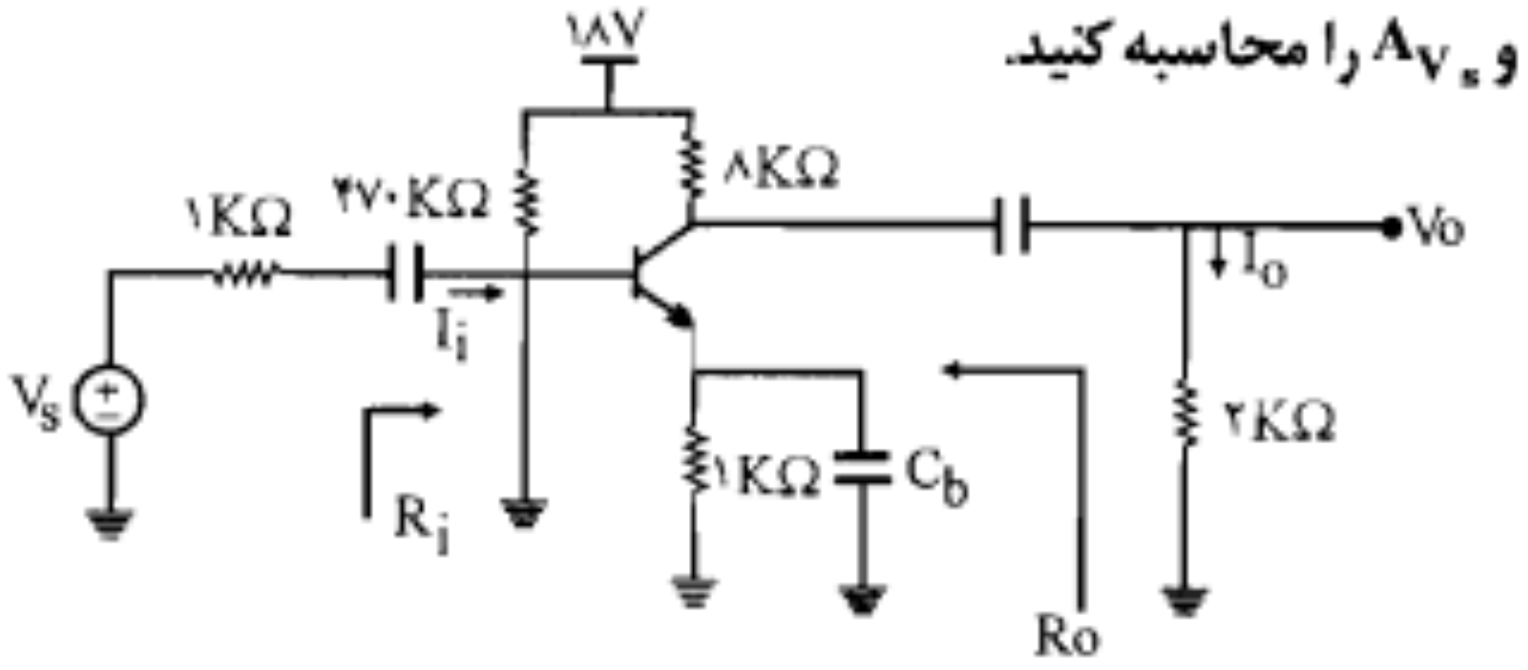
$$R_{th}=۵۵\times ۱۰^{-۳}=\frac{R_۱ R_۲}{R_۱+R_۲}\Rightarrow \frac{۵۵\times ۱۰^{-۳}}{۱/۱۷۲}=\frac{R_۲}{۱۵۷/۲}\Rightarrow R_۲=۷/۳۸\,K\Omega$$

$$\Rightarrow R_۱=\frac{۱/۱۷۲\times ۷/۳۸}{۱۵۷/۲-۱/۱۷۲}=۵۵/۴\,\Omega$$

۱۷ ـ در تقویت کننده شکل م ـ ۱۷ ترانزیستور دارای $h_{fe}=۲۰$ و $h_{fe}=۲۰$ و $h_{oe}=h_{re}=۰$ است.

الف) کمیت‌های A_I و R_i، R_o و A_{V_s} را محاسبه کنید.

ب) اگر خازن کنارگذر C_b را برداریم مقادیر جدید R_i و R_o چقدر خواهند بود؟



شکل م ـ ۱۷

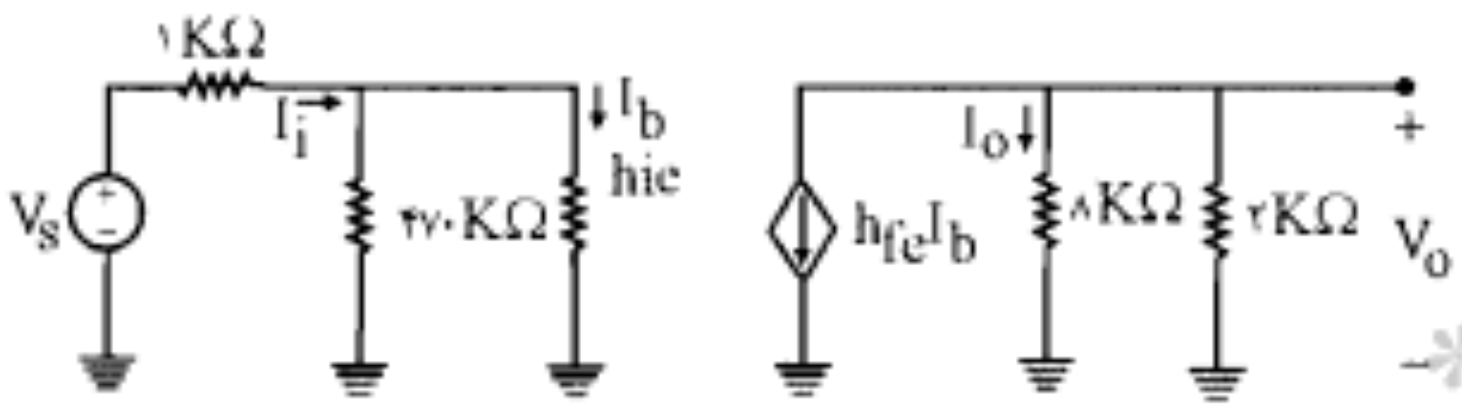
KVL: $۴۷۰ I_B+۱K\Omega\times I_E=V_{CC}-۰/۷=۱۸-۰/۷=۱۷/۳$

$$\Rightarrow ۴۷۰ I_B+(۱+\beta)\times I_B=۱۷/۳\Rightarrow I_B=\frac{۱۷/۳}{۴۷۰+۲۱}=\frac{۱۷/۳}{۴۹۱}$$

$$\Rightarrow I_C=\beta I_B=\frac{۲۰\times ۱۷/۳}{۴۹۱}=۰/۷۰۵\,mA$$

$$\Rightarrow h_{ie}=\frac{h_{fe} V_T}{I_C}=\frac{۲۰\times ۲۶}{۰/۷۰۵}=۰/۷۳۷\,K\Omega$$

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



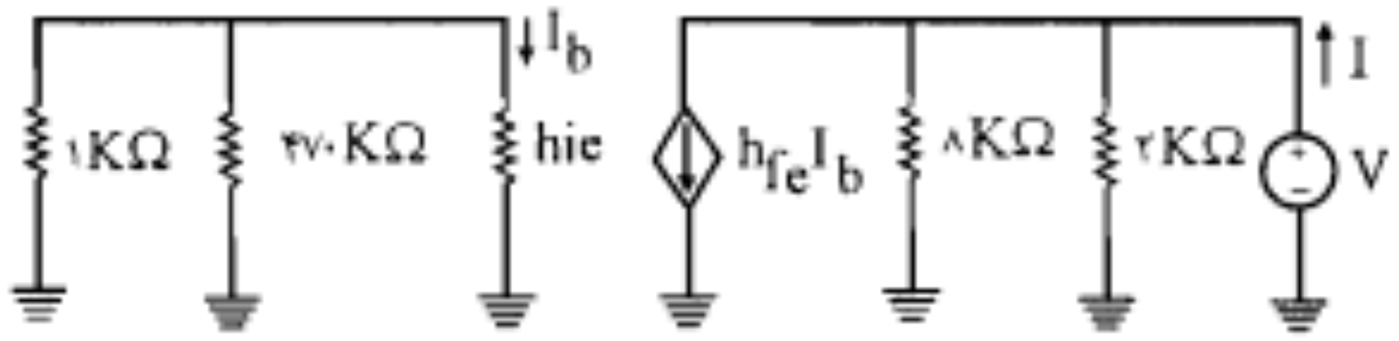
$$A_I=\frac{I_o}{I_i}=\frac{-h_{fe} I_b\times\frac{۸}{۸+۲}}{I_b+\frac{h_{ie} I_b}{۴۷۰}}=\frac{-۲۰\times ۰/۸}{۱+\frac{۰/۷۳۷}{۴۷۰}}=-۱۶$$

$$R_i=۴۷۰\,K\Omega \parallel h_{ie}=۴۷۰\,K\Omega \parallel ۰/۷۳۷\Omega=۰/۷۳۵\,K\Omega$$

$$A_V=A_I\times\frac{R_L}{R_i}=-۱۶\times\frac{۲}{۰/۷۳۵}=-۴۳/۵$$

$$A_{VS}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=-۴۳/۵\times\frac{۰/۷۳۵}{۱+۰/۷۳۵}=-۱۸/۴۳$$

به دست آوردن R_o:



KCL: $I=\frac{V}{۸}+h_{fe} I_b$

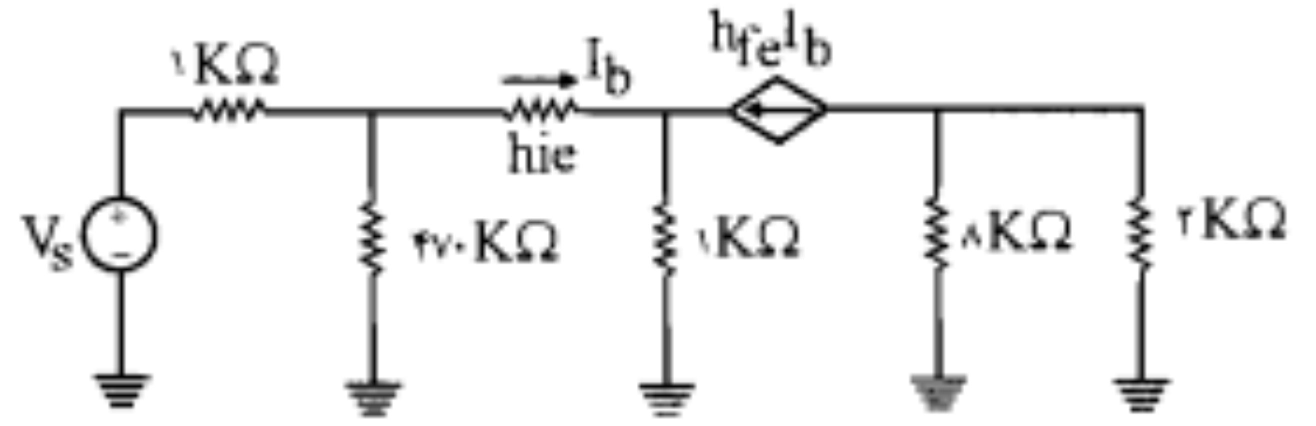
در حلقه h_{ie} و ۴۷۰KΩ و ۱KΩ چون منبع وجود ندارد $I_b=۰$ می‌شود پس در رابطه بالا داریم:

$$I=\frac{V}{۸}+h_{fe}\times ۰\Rightarrow I=\frac{V}{۸}\Rightarrow V_I=۸K\Omega=R'_o$$

$$R_o=\frac{V}{I}\parallel ۲K\Omega=۸K\Omega\parallel ۲K\Omega=\frac{۸\times ۲}{۸+۲}=۱/۶\,K\Omega$$

www.PnuEB.com

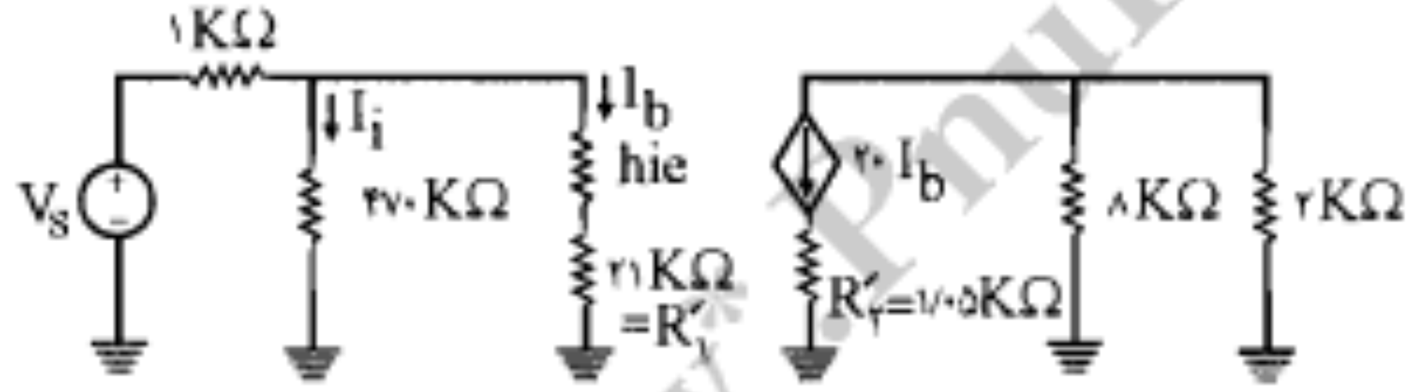
ب) با برداشتن خازن کنارگذر C_b داریم:



مقاومت ۱KΩ که در امیتر قرار می‌دارد را با قضیه دوگان میلر به شاخه‌های کناری تبدیل می‌کنیم.

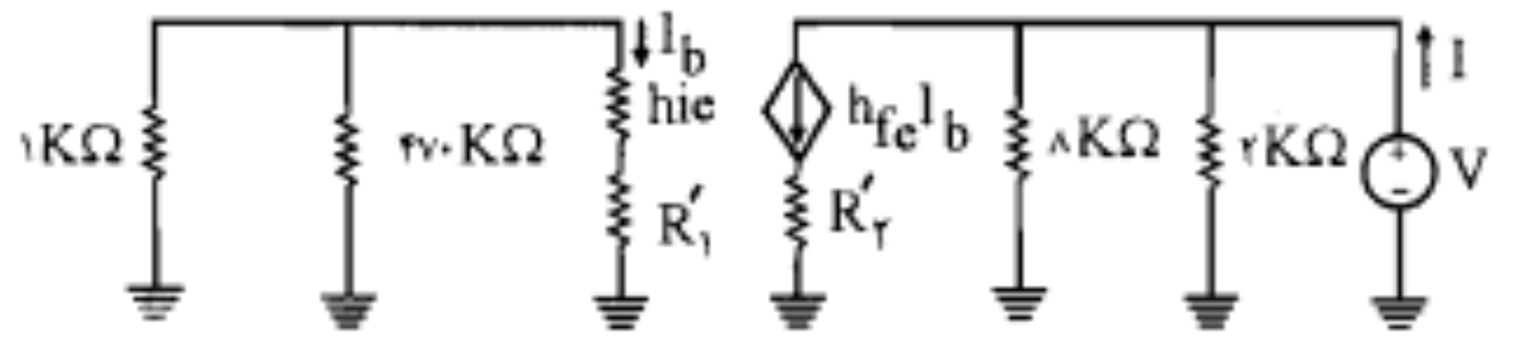
$$K' = \frac{I_۲}{I_۱} = \frac{h_{fe} I_b}{I_b} = h_{fe} = ۲۰ \qquad \begin{cases} R'_۱ = (۱+K')\times R' = ۲۱\times ۱ = ۲۱K\Omega \\ R'_۲ = \frac{۱+K'}{K'} R' = \frac{۲۱}{۲۰}\times ۱ = ۱/۰۵ K\Omega \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر درمی‌آید:



$$R_i = (۴۷۰ K\Omega) \| (R'_۱ + h_{ie}) = ۴۷۰ K\Omega \| (۲۱ + ۰/۷۳۷) = ۲۰/۷۷K\Omega$$

حال محاسبه R_o:



$$I = \frac{V}{۸} + ۲۰ I_b$$

چون در حلقه ۴۷۰KΩ و R_i و h_{ie} و ۱KΩ منبع نداریم پس I_b صفر می‌باشد ($I_b = ۰$) پس داریم:

$$I = \frac{V}{۸} + ۲۰\times ۰ = \frac{V}{۸} \Rightarrow I = \frac{V}{۸} = ۸$$

از طرفی: $R_o = \frac{V}{I} \| ۲K\Omega = ۸K\Omega \| ۲K\Omega = \frac{۸\times ۲}{۸+۲} = ۱/۶ K\Omega$

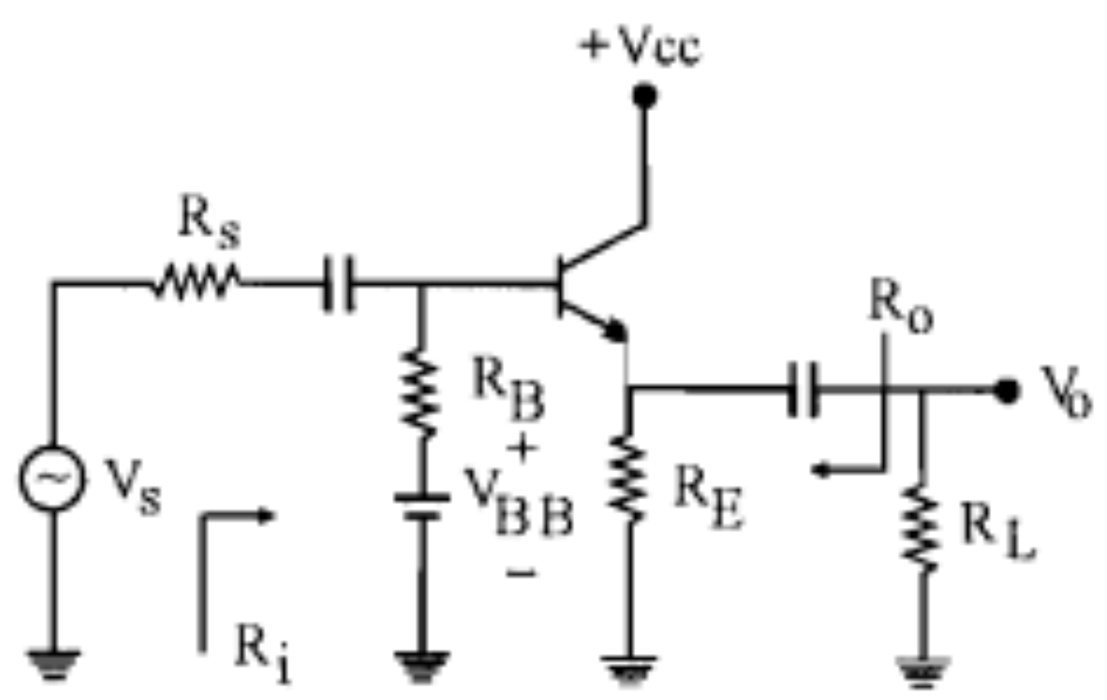
۱۸ ـ برای مدار شکل م – ۱۸ با فرض $R_E = ۱K\Omega$ ، $h_{fe} = ۱۶۰$ ، $h_{ie} = ۰$ و $R_B \to \infty$ مطلوب است:

الف) رسم تغییرات A_V بر حسب R_s ($R_L = ۱K\Omega$ و $۰ < R_s < \infty$)

ب) رسم تغییرات A_V بر حسب R_L
($R_s = ۱K\Omega$ و $۰ < R_L < \infty$)

ج) رسم تغییرات R_i بر حسب R_L
($۰ < R < \infty$)

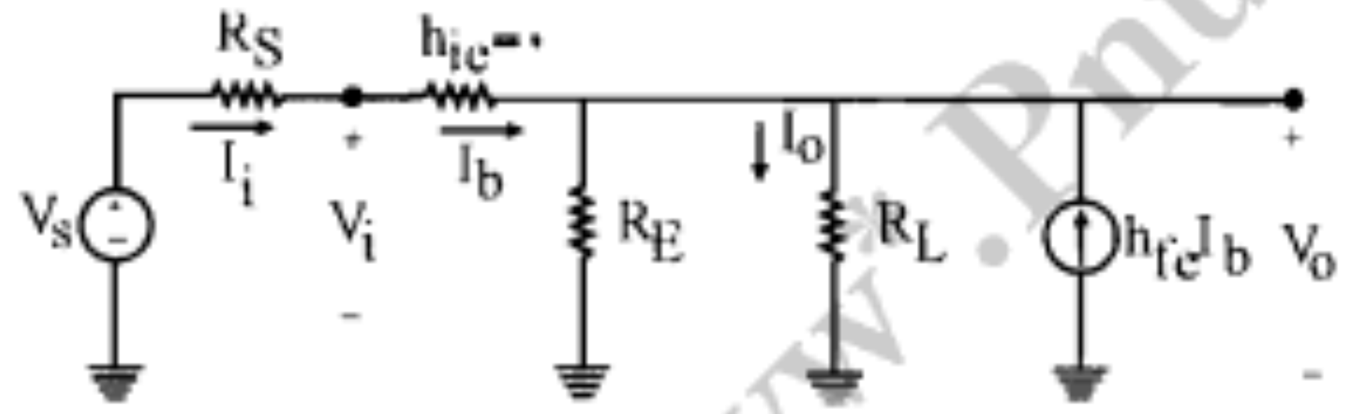
د) رسم تغییرات R_o بر حسب R_s
($۰ < R_s < \infty$)



شکل م – ۱۸

☑ راه حل:

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم.



$$h_{ie} = ۰ \to A_V = \frac{V_O}{V_i} = ۱$$

الف) اگر $h_{ie} = ۰$ باشد V_i در دو سر مقاومت R_E قرار می‌گیرد یعنی $V_O = V_i$ می‌باشد. پس A_V تابعی از هیچ تغییری نمی‌باشد. پس تغییرات A_{vs} را بر حسب R_s و R_L رسم می‌کنیم:

$$A_{vs} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{V_o}{R_s I_b + V_o} \quad (I)$$

طبق مدار: $V_o = (I_b + h_{fe} I_b)(R_E \| R_L) = I_b \times (۱ + ۱۶۰) \times \frac{۱K\Omega \times ۱K\Omega}{۱K\Omega + ۱K\Omega}$

$$\Rightarrow I_b = \frac{V_O \times ۲}{۱۶۱} \quad (II)$$

www.PnuEB.com

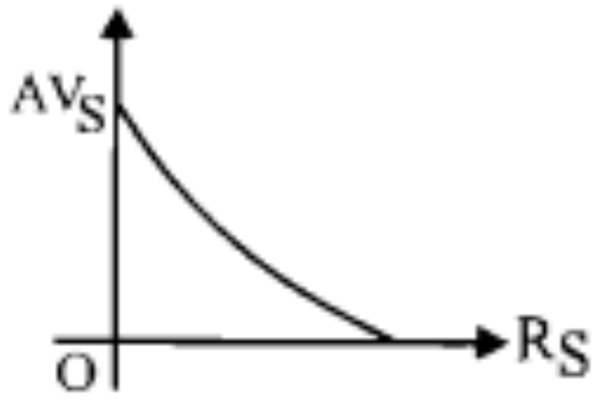
رابطه (II) را در رابطه (I) جایگزین می‌کنیم.

$$A_{vs}=\frac{V_O}{V_s}=\frac{V_O}{R_s\times\frac{۲V_O}{۱۶۱}+V_O}=\frac{V_O}{V_O(\frac{۲R_s}{۱۶۱}+۱)}=\frac{۱۶۱}{۲R_s+۱۶۱}$$

مشتق منفی است پس تابع همواره نزولی است.

$$\frac{dA_{vs}}{dR_s}=۱۶۱\times\frac{-۲}{(۲R_s+۱۶۱)^۲}\Rightarrow$$

در رابطه A_{vs} به ازای R_s برابر صفر A_{vs} برابر ۱ می‌شود و به ازای R_s برابر بی‌نهایت A_{vs} صفر می‌شود پس نمودار به صورت زیر می‌شود.



ب) رسم تغییرات A_{vs} بر حسب R_l خواسته شده:

$$A_{vs}=\frac{V_\cdot}{V_s}=\frac{V_O}{R_sI_b+V_O}$$

طبق مدار: $V_O=(I_b+h_{fe}I_b)(R_E\|R_L)=I_b(۱+h_{fe})(\frac{R_ER_L}{R_E+R_L})\Rightarrow I_b=\frac{V_O(R_L+R_E)}{(۱+h_{fe})R_ER_L}$

با جایگذاری $\Rightarrow A_{vs}=\frac{V_O}{R_s\times\frac{V_O(R_L+R_E)}{(۱+h_{fe})R_ER_L}+V_O}=\frac{۱۶۱R_ER_L}{R_S(R_L+R_E)+۱۶۱R_ER_L}$

$$\begin{cases}R_S=۱K\Omega\\R_E=۱K\Omega\end{cases}\Rightarrow A_{VS}=\frac{۱۶۱\times R_L}{(R_L+۱)+۱۶۱R_L}=\frac{۱۶۱R_L}{۱۶۲R_L+۱}$$

$$\Rightarrow\frac{dA_{vs}}{dR_L}=\frac{۱۶۱(۱۶۲R_L+۱)-۱۶۲(۱۶۱)R_L}{(۱۶۲R_L+۱)^۲}=\frac{۱۶۱}{(۱۶۲R_L+۱)^۲}$$

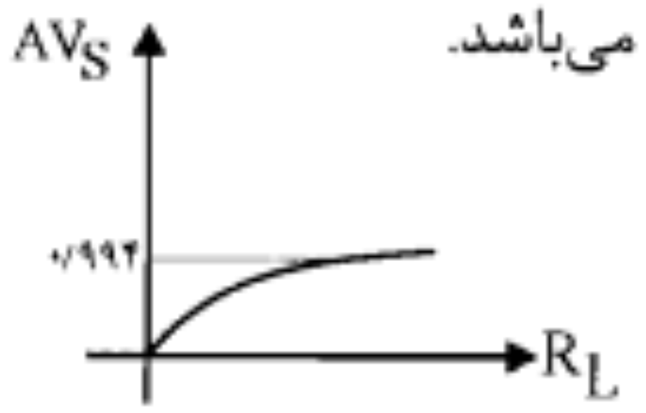
مشتق مثبت است پس همواره صعودی است.

$$\Rightarrow\frac{dA_{VS}}{dR_L}=\frac{۱۶۱}{(۱۶۲R_L+۱)^۲}>۰\Rightarrow$$

طبق فرض مسئله $۰<R_L<\infty$ می‌باشد.

پس در رابطه A_{VS} داریم:

$$\begin{cases}R_L=۰\Rightarrow A_{VS}=۰\\R_L=\infty\Rightarrow A_{VS}=\frac{۱۶۱}{۱۶۲}=۰/۹۹۴\end{cases}$$



ج)

$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{V_O}{I_b}=\frac{V_O}{\frac{V_O(R_L+R_E)}{۱۶۱R_LR_E}}=\frac{۱۶۱R_L\times R_E}{(R_L+R_E)}$$

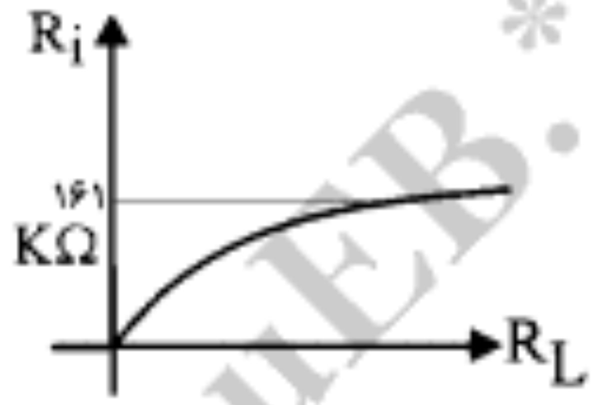
$$R_E=۱K\Omega\Rightarrow R_i=\frac{۱۶۱R_L}{R_L+۱}\Rightarrow\frac{dR_i}{dR_L}=۱۶۱\frac{(۱)}{(R_L+R_E)}$$

مشتق مثبت است

$$R_E=۱K\Omega\Rightarrow R_i=\frac{۱۶۱R_L}{R_L+۱}\Rightarrow\frac{dR_i}{dR_l}=۱۶۱\frac{(۱)}{(R_L+۱)^۲}>۰$$

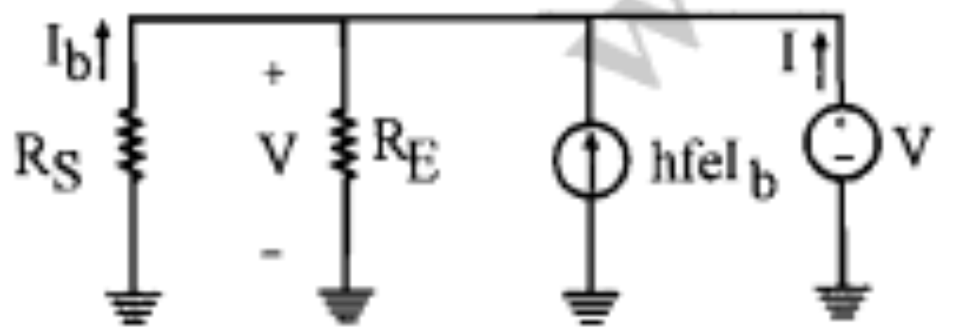
پس تابع همواره صعودی است. و طبق فرض مسئله $۰<R_L<\infty$ می‌باشد پس در رابطه R_i داریم:

$$\begin{cases}R_L=۰\Rightarrow R_i=۰\\R_L=\infty\Rightarrow R_i=۱۶۱\ K\Omega\end{cases}$$



د) برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ در دو سر R_E موازی با آن قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می‌کنیم. جریان عبوری از آن را I در نظر می‌گیریم:

$$I=\frac{V}{R_E}-I_b-h_{fe}I_b=\frac{V}{R_E}-(۱+h_{fe})I_b$$



از طرفی طبق مدار: $I_b=\frac{-V}{R_s}$

$$I=\frac{V}{R_E}-(۱+h_{fe})(\frac{-V}{R_S})=V\times\frac{R_S+(۱+h_{fe})R_E}{R_ER_S}$$

$$R_O=\frac{V}{I}=\frac{R_SR_E}{R_S+(۱+h_{fe})R_E}\qquad R_E=۱K\Omega\Rightarrow R_O\frac{R_S}{R_S+۱۶۱}$$

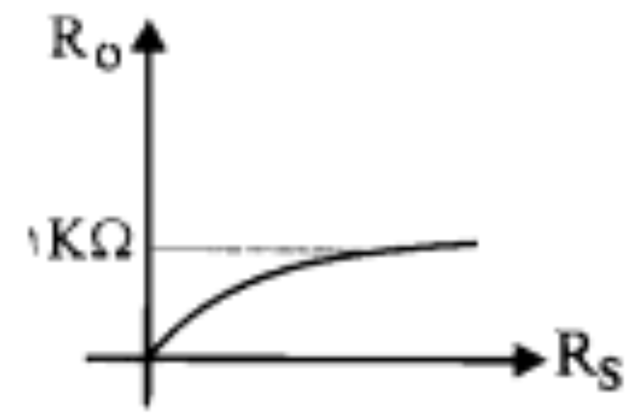
مشتق مثبت است پس تابع همواره صعودی است

$$\frac{dR_O}{dR_S}=\frac{۱۶۱}{(R_S+۱۶۱)^۲}>۰\Rightarrow$$

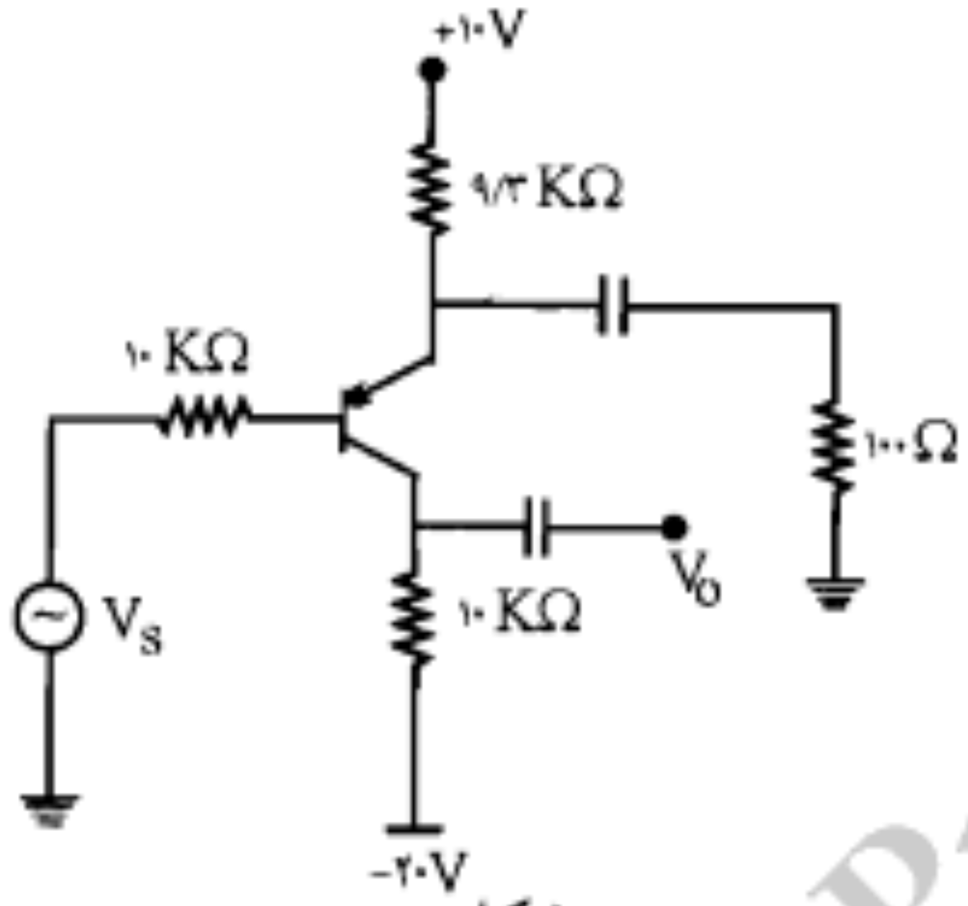
www.PnuEB.com

طبق فرض مسئله $\infty > R_S > ۰$ می‌باشد پس در رابطه R_O داریم:

$$\begin{cases} R_S = ۰ \Rightarrow R_O = ۰ \\ R_S = \infty \Rightarrow R_O = ۱K\Omega \end{cases}$$



۱۹ـ در مدار شکل م - ۱۹، با فرض $h_{fe} = ۱۰۰$، مقدار A_{VS} را محاسبه کنید.



شکل م – ۱۹

☑ **راه حل:**

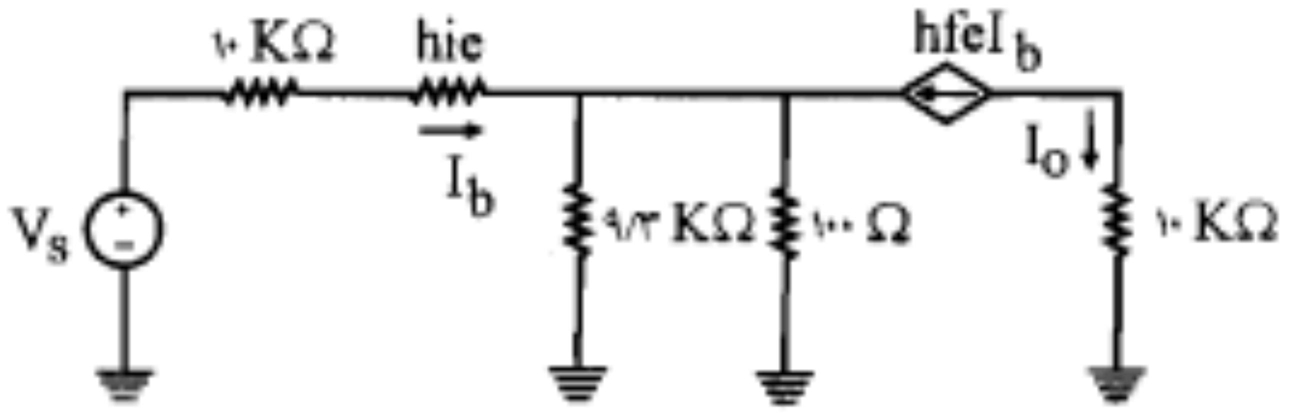
در حلقه V_S و V_{EB} و V_{CC} و R_B و R_C، KVL می‌زنیم (البته در تحلیل dc منبع ولتاژ V_S بی‌اثر می‌شود.)

$$KVL: ۹/۳ I_E + ۱۰ I_B = V_{CC} - V_{EB} = ۱۰ - ۰/۷ = ۹/۳ \Rightarrow ۹/۳ I_B (۱+\beta) + ۱۰ I_B = ۹/۳$$

$$\Rightarrow R_B = \frac{۹/۳}{۱۰ + ۱۰۱ \times ۹/۳} = ۰/۰۰۹۸ \, mA \Rightarrow I_C = \beta I_B = ۰/۹۸ mA \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶ \times ۱۰^{-۳}}{۰/۹۸} = ۲/۶۵ K\Omega$$

مدار معادل:



پس باید R_i محاسبه شود:

$$A_{VS} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_S}$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b} = -h_{fe} = -۱۰۰ \Rightarrow R_i = h_{ie} + R'_۱$$

$$R'_۱ = (۱+K')R' \quad , \quad R' = ۹/۳ K\Omega \parallel ۰/۱ K\Omega = \frac{۹/۳ \times ۰/۱}{۹/۴} = ۰/۰۹۹ K\Omega$$

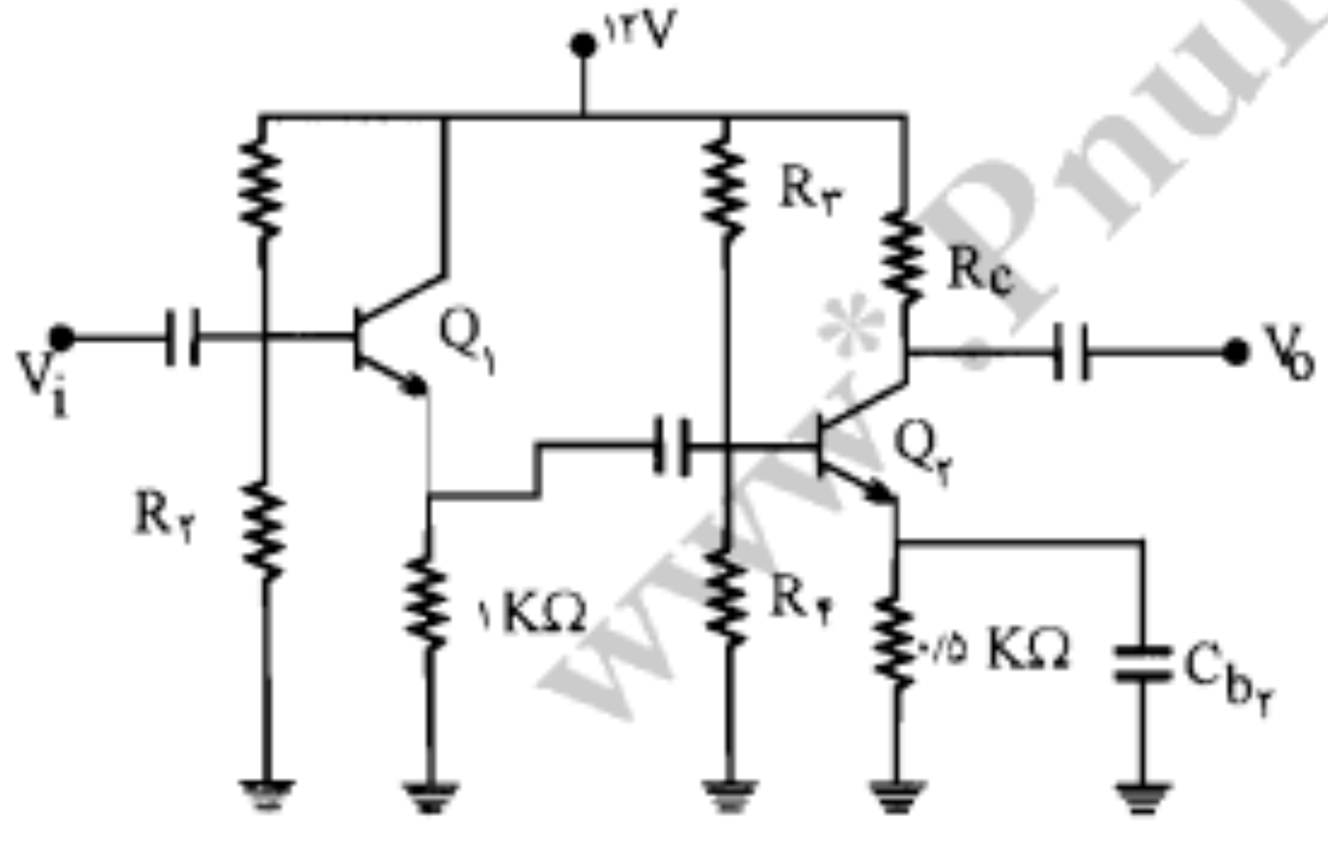
$$K' = \frac{h_{fe} i_b}{i_b} = ۱۰۰ \Rightarrow R'_۱ = (۱+۱۰۰) \times ۰/۰۹۹ = ۹/۹۹۹$$

$$\Rightarrow R_i = h_{ie} + ۹/۹۹۹ = ۲/۶۵ + ۹/۹۹۹ = ۱۲/۶۵ \, K\Omega$$

$$\Rightarrow A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۱۰۰ \times \frac{۱۰}{۱۲/۶۵} = -۷۹/۱$$

$$\Rightarrow A_{VS} = -۷۹/۱ \times \frac{۱۲/۶۵}{۱۲/۶۵ + ۱۰} = -۴۴/۱۷$$

۲۰ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۲۰ برای هر دو ترانزیستور $h_{fe} = ۱۰۰$، $h_{oe} = h_{re} = ۰$ و برای $Q_۲$ در نقطه کار $h_{ie_۲} = ۱K\Omega$ است. مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$، $R_۳$، $R_۴$ و R_c را طوری تعیین کنید که هر دو ترانزیستور پایداری خوبی نسبت به نقطه کار برخوردار بوده و دامنه نوسان خروجی هر یک حداکثر باشد. همچنین می‌خواهیم $|A_V| \ge ۱۰۰$ باشد.



شکل م ـ ۲۰

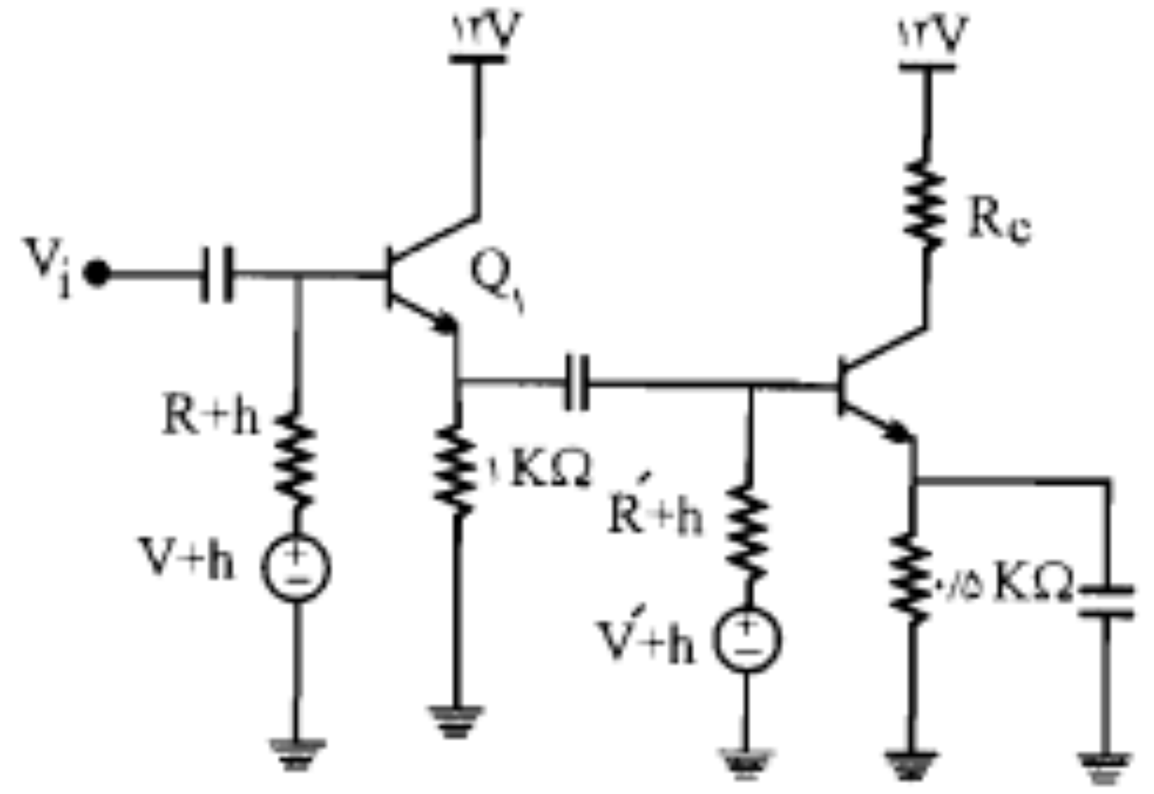
☑ **راه حل:**

$$Q_۱: \begin{cases} R_{th} = R_۱ \parallel R_۲ = \frac{R_۱ R_۲}{R_۱ + R_۲} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} = ۱۲ \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} \end{cases}$$

$$Q_۲: \begin{cases} R'_{th} = R_۳ \parallel R_۴ = \frac{R_۳ R_۴}{R_۳ + R_۴} \\ V'_{th} = V_{CC} \times \frac{R_۴}{R_۳ + R_۴} = ۱۲ \frac{R_۴}{R_۳ + R_۴} \end{cases}$$

www.PnuEB.com

با اجرای تونن مدار معادل به صورت زیر می‌شود:



حلقه $R_{th}\ ,V_{th}\ ,1K\Omega\ ,V_{BE}$

$$KVL: R_{th} I_{B_1} + R_E I_{E_1} = V_{th} - V_{BE}$$

فرض: $I_{C_1} = I_{E_1}$

$$R_{th}\cdot\frac{I_{C_1}}{\beta_1} + R_E I_{C_1} = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_1}\left(\frac{R_{th}}{\beta_1} + R_E\right) = V_{th} - 0.7 \quad (I)$$

برای اینکه ترانزیستور پایداری خوبی نسبت به β_1 برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta_1} = 0.1 R_{E_1} = 0.1\times 1K\Omega = 0.1 \Rightarrow R_{th} = 0.1\beta_1 = 0.1\times 100 = 10K\Omega$$

پس با جایگذاری مقدار R_{th}، در رابطه (I) داریم:

$$I_{C_1}\left(\frac{10}{100} + 1\right) = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_1} = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} \quad (II)$$

و برای اینکه دامنه نوسان خوبی Q_1 حداکثر شود باید داشته باشیم:

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{CC} - V_{CE_1}(sat)}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} \quad (III)$$

حلقه: $R'_{th}\ ,V'_{th}\ ,0.5K\Omega\ ,V_{BE_2}$

$$KVL: R'_{th} I_{B_2} + 0.5 I_{E_2} = V'_{th} - V_{BE_2}$$, فرض: $I_{C_2} = I_{E_2}$

$$\Rightarrow R'_{th}\frac{I_{C_2}}{\beta_2} + 0.5 I_{C_2} = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_2}\left(\frac{R'_{th}}{\beta_2} + 0.5\right) = V'_{th} - 0.7 \quad (IV)$$

و برای اینکه ترانزیستور از پایداری خوبی نسبت به β_2 برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R'_{th}}{\beta_2} = 0.1 R_{E_2} \Rightarrow \frac{R'_{th}}{100} = 0.1\times 0.5 \Rightarrow R'_{th} = 0.05\times 100 = 5K\Omega$$

با جایگذاری این مقدار در رابطه (IV) داریم:

$$I_{C_2}\left(\frac{R'_{th}}{\beta_2} + 0.5\right) = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_2}\left(\frac{5}{100} + 0.5\right) = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_2} = \frac{V'_{th} - 0.7}{0.55} \quad (V)$$

و برای اینکه دامنه نوسان خروجی Q_2 حداکثر شود باید داشته باشیم:

$$I_{CQ_2} = \frac{V_{cc} - V_{CE_2}(sat)}{R_{ac_2} + R_{dc_2}}$$

$$h_{ie_2} = \frac{h_{fe_2} V_T}{I_{C_2}} = \frac{100\times 26}{I_{C_2}} = 1K\Omega \Rightarrow I_{C_2} = 2.6\ mA$$

این مقدار را در رابطه (V) قرار می‌دهیم:

$$I_{C_2} = \frac{V'_{th} - 0.7}{0.55} = 2.6\,mA \Rightarrow V'_{th} = 2.6\times 0.55 + 0.7 = 2.13V$$

$$\begin{cases} V'_{th} = V_{CC}\times\dfrac{R_4}{R_3 + R_4} = 12\dfrac{R_4}{R_3 + R_4} = 2.13 \\ R'_{th} = \dfrac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 5K\Omega \end{cases} \xRightarrow[\text{تقسیم دو رابطه بر هم}]{} \frac{12}{R_3} = \frac{2.13}{5} \Rightarrow R_3 = \frac{12\times 5}{2.13} = 28.17K\Omega$$

$$R_4 = \frac{R'_{th}\times R_3}{R_3 - R'_{th}} = \frac{5\times 28.17}{28.17 - 5} = 6.07\,K\Omega$$

در رابطه I_{CQ_2} از $V_{CE}(sat)$ صرفنظر می‌کنیم و در این رابطه داریم:

$$I_{CQ_2} = \frac{V_{CC} - V_{CE_2}(sat)}{R_{ac_2} + R_{dc_2}} \Rightarrow 2.6\,mA = \frac{12 - 0}{R_{ac_2} + R_{dc_2}} \quad \begin{cases} R_{ac_2} = R_C \\ R_{dc_2} = R_C + R_E = R_C + 0.5 \end{cases}$$

$$\Rightarrow 2.6 = \frac{12}{R_C + (R_C + 0.5)} = \frac{12}{(2R_C + 0.5)} \Rightarrow R_C = 2.06\ K\Omega$$

و در رابطه I_{CQ_1} (III) از $V_{CE_1}(sat)$ صرفنظر می‌کنیم و داریم:

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{CC} - V_{CE_1}(sat)}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} = \frac{12}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} \qquad \begin{cases} R_{dc_1} = R_{E_1} = 1K\Omega \\ R_{ac_1} = 1K\Omega \parallel R_{in} \end{cases}$$

$$R_{in} = R'_{th} \parallel R_{b_2} \quad , \quad R_{b_2} = h_{ie_2} = 1K\Omega$$

$$R_{in} = 5K\Omega \parallel 1K\Omega = \frac{5}{6}K\Omega$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow R_{ac_1} = 1K\Omega \parallel R_{in} = 1K\Omega \parallel \frac{5}{6}K\Omega = \frac{\frac{5}{6}\times 1}{\frac{5}{6}+1} = \frac{5}{11}\ K\Omega$$

$$\Rightarrow I_{CQ_1} = \frac{12}{\frac{5}{11}+1} = \frac{12\times 11}{5+11} = 8.25\ mA$$

$$(II):\ I_{C_1} = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} = 8.25 = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} \Rightarrow V_{th} = 9.775\ V$$

$$\begin{cases} V_{th} = 9.775 = 12\,\dfrac{R_2}{R_1+R_2} \\ R_{th} = \dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2} = 10\ K\Omega \end{cases} \Rightarrow$$

این دو رابطه را بر هم تقسیم می‌کنیم

$$\frac{9.775}{10} = \frac{R_1}{12} \Rightarrow R_1 = 12.28\ K\Omega \quad \text{و} \quad R_2 = \frac{R_{th}\times R_1}{R_1 - R_{th}} = \frac{10\times 12.28}{12.28 - 10} = 53.86\ K\Omega$$

و همچنین می‌خواهیم $|A_V| \geq 100$ شود:

Q_1: کلکتور مشترک و Q_2: امیتر مشترک

$$A_{V_1} = \frac{V_{e_1}}{V_{b_1}} = A_I \times \frac{R_{i_1}}{R_{b_1}} = (1+h_{fe}) \times \frac{R_{L_1}}{R_{b_1}}$$

$$R_{L_1} = R_{E_1} \parallel R_{in} = \frac{5}{11}\ K\Omega \quad , \quad R_{b_1} = h_{ie_1} + (1+h_{fe})R_{L_1}$$

$$h_{ie_1} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_1}} = \frac{100\times 26}{8.26}\ \ 0.315\ K\Omega \Rightarrow R_{b_1} = 0.315 + 101\times\frac{5}{11} = 46.2\ K\Omega$$

$$\Rightarrow AV_1 = (1+100)\times\frac{\frac{5}{11}}{46.2} = 0.994$$

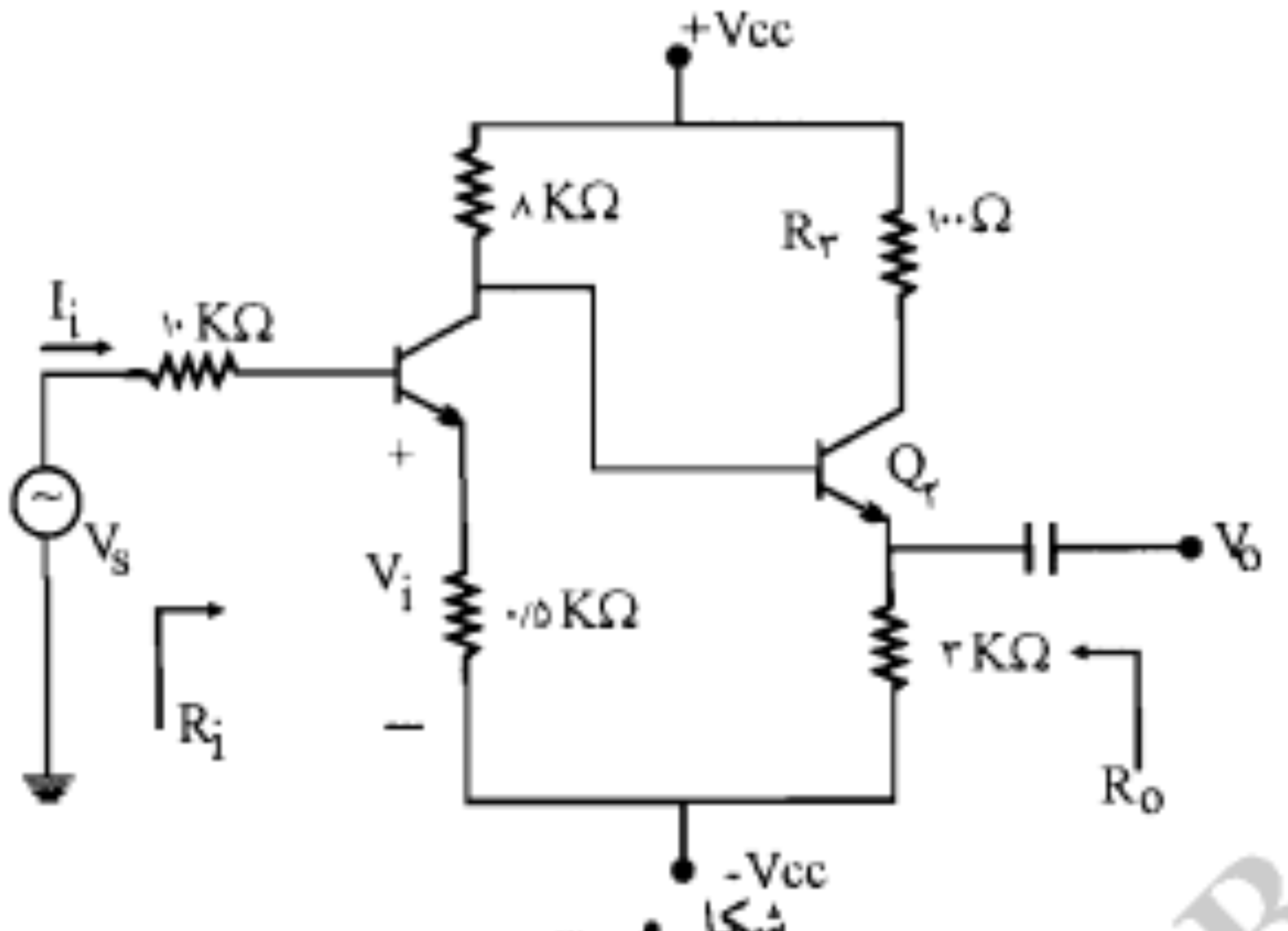
$$A_{V_2} = \frac{V_{C_2}}{V_{b_2}} = -h_{fe}\frac{R_{L_2}}{R_{b_2}} \qquad \begin{cases} R_{L_2} = R_C = 2.06 \\ R_{b_2} = h_{ie_2} = 1K\Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_2} = -100\times\frac{2.06}{1} = -206$$

$$A_V = A_{V_1}\times A_{V_2} = 0.994\times(-206) = -205$$

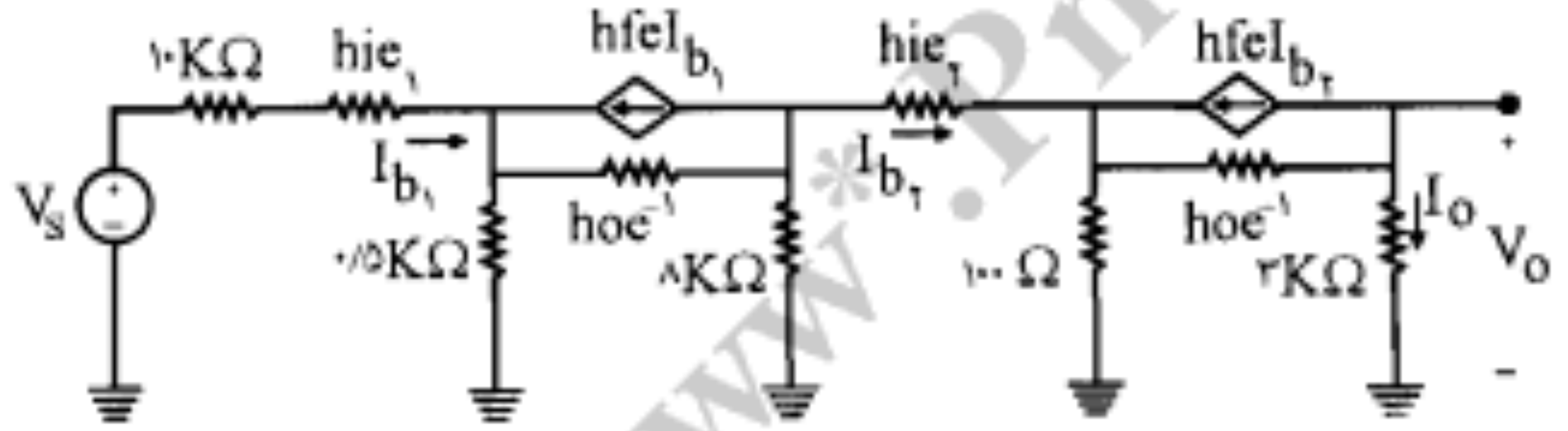
$$\Rightarrow |A_V| = |-205| = 205 \geq 100$$

۲۱ـ در مدار تقویت کننده شکل م ـ ۲۱، با فرض $h_{ie_1} = h_{ie_2} = 1.1K\Omega$ و $h_{fe_1} = h_{fe_2} = 50$ و $h_{re_1} = h_{re_2} \cong 0$ و $h_{oe_1}^{-1} = h_{oe_2}^{-1} = 40\ K\Omega$، مقادیر کمیت‌های R_i، A_I، A_V و A_{V_s} را به دست آورید؟

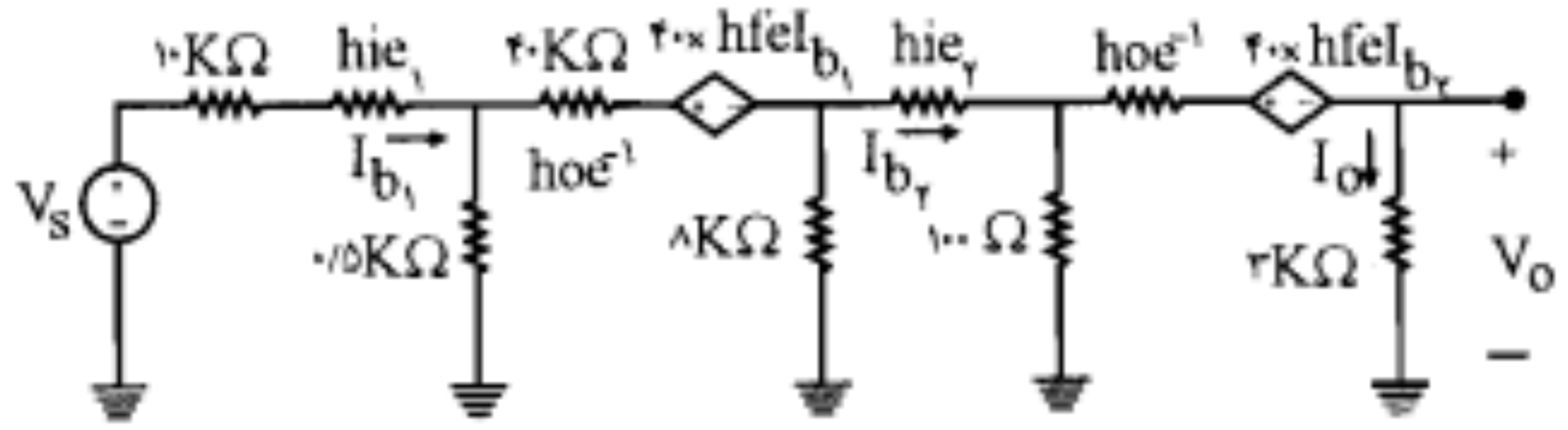


شکل م ـ ۲۱

☑ **راه حل:** مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



h_{oe}^{-1} با منبع جریان $h_{fe}I_b$ موازی می‌باشد با استفاده از قضیه نورتن داریم:



حلقه: $3K\Omega\ ,\ 100\Omega\ ,\ h_{oe}^{-1}\ ,\ 40\times h_{fe}I_{b_1}$

$$KVL:\ 3I_O + h_{oe}^{-1}I_O + 0.1(I_O - I_{b_2}) = -40\,h_{fe}I_{b_2} = -40\times 50\,I_{b_2} = -2000\,I_{b_2}$$

$$\Rightarrow 43.1\,I_O = -1999.9\,I_{b_2} \Rightarrow I_O = -46.4\,I_{b_2}$$

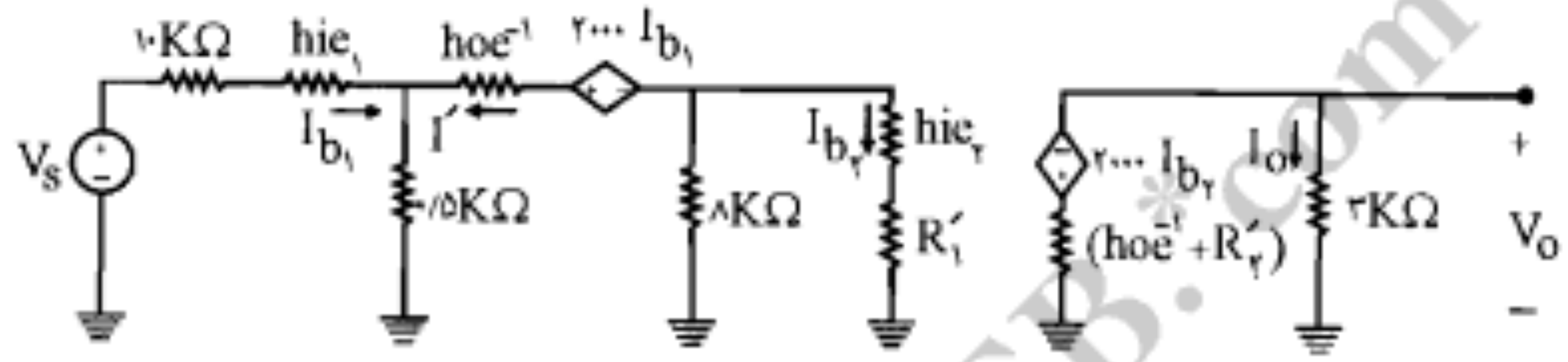
www.PnuEB.com

با استفاده از دوگان قضیه میلر در مقاومت $R_{E_۲} = ۰/۱K\Omega$ داریم:

$$\begin{cases} I_۱ = I_{b_۲} \\ I_۲ = -I_O \end{cases} \qquad K' = \frac{I_۲}{I_۱} = \frac{+۴۶/۴\, I_{b_۲}}{I_{b_۲}} = +۴۶/۴$$

$$\begin{cases} R'_۱ = R' \times (۱ + K') = ۰/۱ \times (۱ + ۴۶/۴) = ۴/۷۴\ K\Omega \\ R'_۲ = R' \times (\frac{۱ + K'}{K'}) = ۰/۱ \times \frac{۱ + ۴۶/۴}{۴۶/۴} = ۰/۱۰۲\ K\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



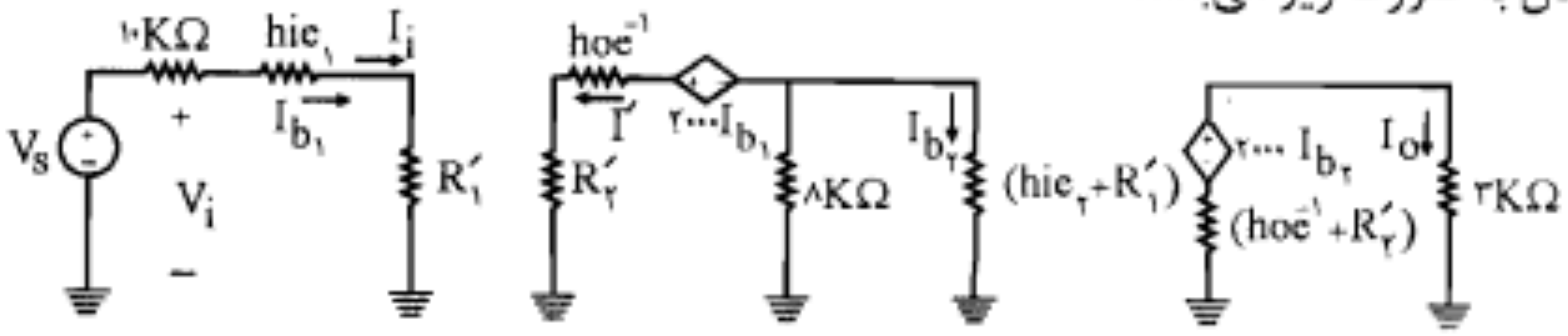
$$KVL: I'(۴۰ + (۸K\Omega \parallel (h_{ie_۲} + R'_۱))) + ۰/۵(I' + I_{b_۱}) = ۲۰۰۰\, I_{b_۱}$$

$$I' \times ۴۳/۳۷ + ۰/۵ I_{b_۱} + ۰/۵ I' = ۲۰۰۰\, I_{b_۱} \Rightarrow I' = ۴۵/۵۸\, I_{b_۱}$$

حال با استفاده از دوگان قضیه میلر در مقاومت $R_{E_۱}$ یعنی $۰/۵K\Omega$ داریم:

$$K' = \frac{I_۲}{I_۱} = \frac{I'}{I_{b_۱}} = \frac{۴۵/۵۸\, I_{b_۱}}{I_{b_۱}} = ۴۵/۵۸ \Rightarrow \begin{cases} R'_۱ = R'(۱ + K') = ۰/۵(۱ + ۴۵/۵۸) = ۲۳/۲۹\, K\Omega \\ R'_۲ = R'(\frac{۱ + K'}{K'}) = ۰/۵ \times \frac{۱ + ۴۵/۵۸}{۴۵/۵۸} = ۰/۵۱ \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-۴۶/۴\, I_{b_۲}}{I_{b_۱}} \quad , \quad I_{b_۲} = -I' \times \frac{۸K\Omega}{۸K\Omega + (h_{ie_۲} + R')} = -I' \times \frac{۸}{۸ + ۵/۸۴}$$

$$\Rightarrow I_{b_۲} = -۴۵/۵۸\, I_{b_۱} \times \frac{۸}{۱۳/۸۴} = -۲۶/۳۵\, I_{b_۱}$$

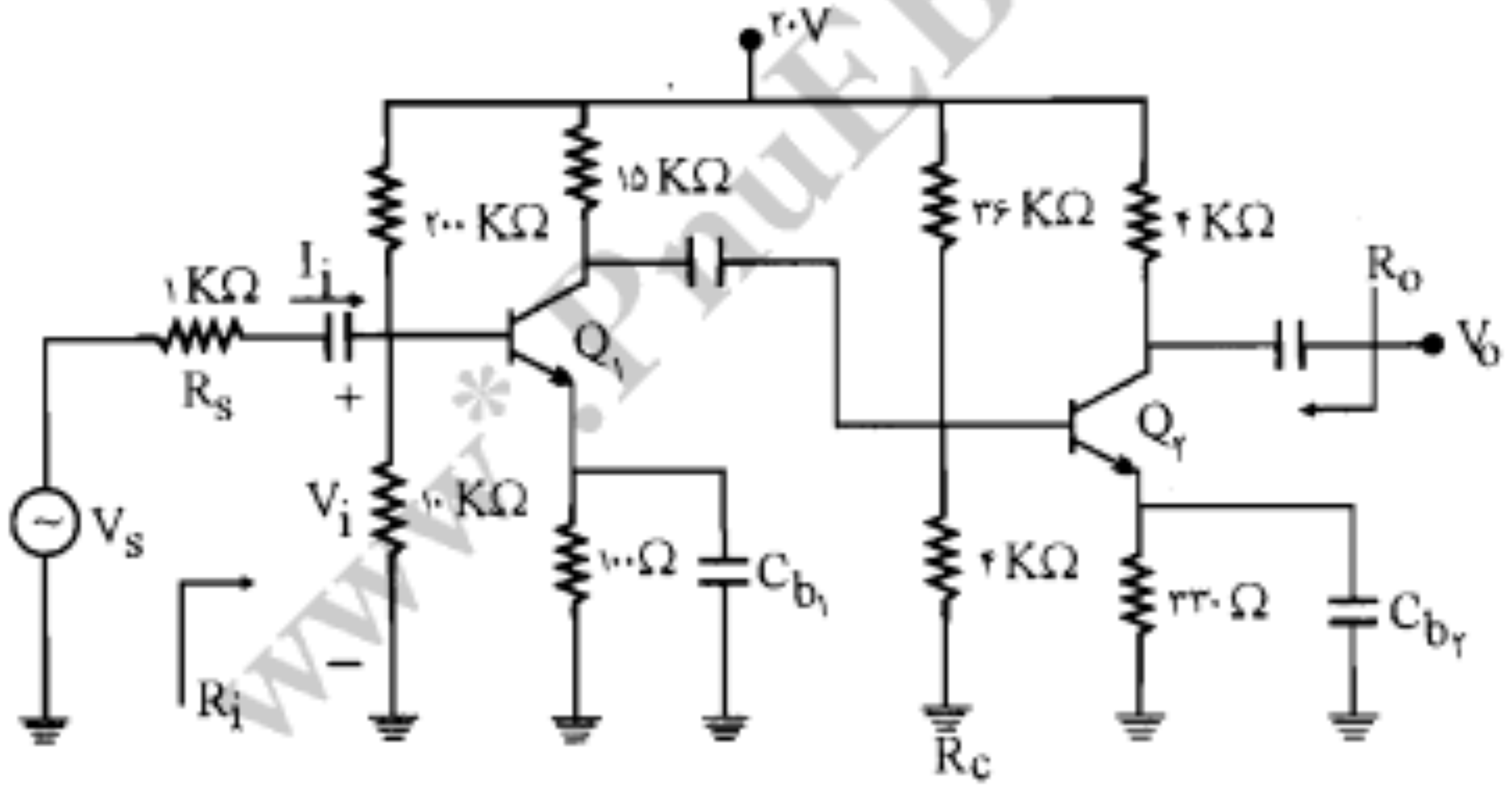
$$\Rightarrow A_I = \frac{-۶۴/۴ \times -۲۶/۳۵\, I_{b_۱}}{I_{b_۱}} = ۱۲۲۲/۶۴$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = h_{ie_۱} + R'_۱ = ۱/۱ + ۲۳/۲۹ = ۲۴/۳۹\ K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۱۲۲۲/۶۴ \times \frac{۳K\Omega}{۲۴/۳۹} = ۱۵۰/۳۸$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = ۱۵۰/۳۸ \times \frac{۲۴/۳۹}{۲۴/۳۹ + ۱۰K\Omega} = ۱۰۶/۶۵$$

۲۲ـ در مدار تقویت‌کننده شکل م ـ ۲۲ ترانزیستورها مشابه و دارای $h_{fe} = ۵۰$ ، $h_{oe}^{-1} = ۴۰K\Omega$ و $h_{re} \cong ۰$ و $h_{oe}^{-1} = ۴۰K\Omega$ هستند. مقادیر A_V ، A_{vs} ، R_i ، A_I و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م-۲۲

☑ **راه حل:**

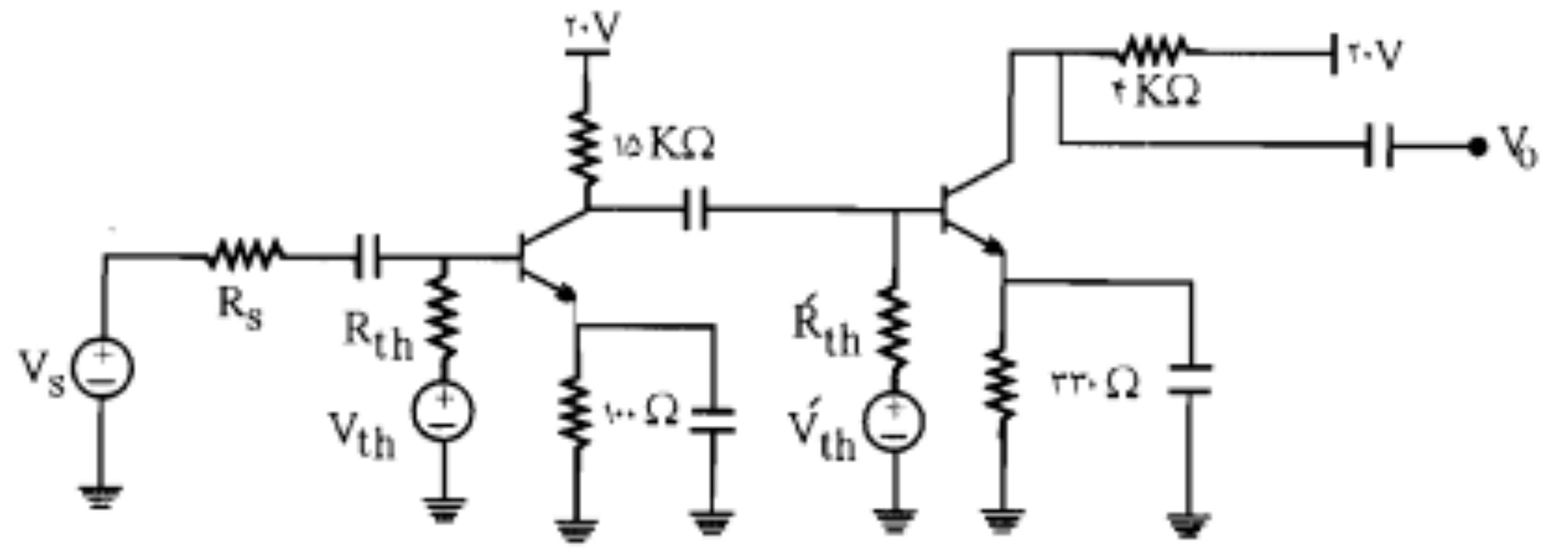
تونن در $Q_۱$:

$$\begin{cases} R_{th} = ۱۰K\Omega \parallel ۲۰۰K\Omega \parallel = \frac{۱۰ \times ۲۰۰}{۱۰ + ۲۰۰} = ۹/۵۲\ K\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} = ۲۰ \times \frac{۱۰}{۱۰ + ۲۰۰} = ۰/۹۵V \end{cases}$$

تونن در $Q_۲$:

$$\begin{cases} R'_{th} = ۳۶\Omega \parallel ۴K\Omega = \frac{۳۶ \times ۴}{۳۶ + ۴} = ۳/۶K\Omega \\ V'_{th} = V_{CC} \times \frac{۴K\Omega}{۳۶K\Omega + ۴K\Omega} = \frac{۲۰ \times ۴}{۴۰} = ۲V \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



KVL: $R_{th} I_{B_۱} + R_{E_۱} I_{E_۱} = V_{th} - V_{BE_۱}$

فرض: $I_{C_۱} = I_{E_۱} \quad \Rightarrow \quad R_{th} = \frac{I_{C_۱}}{\beta_۱} + R_{E_۱} \times I_{C_۱} = V_{th} - V_{BE_۱}$

$\Rightarrow ۹/۵۲ \times \frac{I_{C_۱}}{۵۰} + ۰/۱ \times I_{C_۱} = ۰/۹۵ - ۰/۷ = ۰/۲۵ \Rightarrow I_{C_۱} = ۰/۸۶ \, mA$

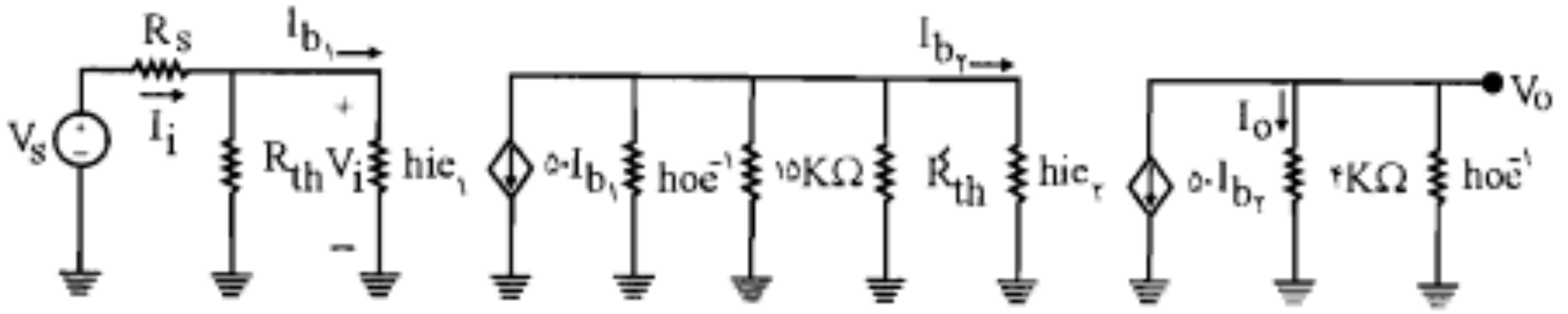
$\Rightarrow h_{ie_۱} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۱}} = \frac{۵۰ \times ۲۶}{۰/۸۶} = ۱/۵ K\Omega$

KVL: $R'_{th} I_{B_۲} + R_{E_۲} I_{E_۲} = V'_{th} - V_{BE_۲}$ فرض: $I_{C_۲} = I_{E_۲}$

$۳/۶ \frac{I_{C_۲}}{\beta_۲} + ۰/۳۳ I_{C_۲} = ۲ - ۰/۷ = ۱/۳$

$\Rightarrow I_{C_۲} = \frac{۱/۳}{۰/۴۰۲} = ۳/۲۳ \, mA \Rightarrow h_{ie_۲} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۲}} = \frac{۵۰ \times ۲۶}{۳/۲۳} = ۰/۴ K\Omega$

پس مدار معادل ac به صورت زیر درمی‌آید:



با استفاده از تقسیم جریان:

$A_I = \frac{I_O}{I_i}$, $I_O = -۵۰ \, Ib_۲ \times \frac{۴۰ K\Omega}{۴۰ + ۴} = -۴۵/۴۵ \, Ib_۲$

$I_i = I_{b_۱} + \frac{h_{ie_۱} I_{b_۱}}{R_{th}} = I_{b_۱} + \frac{۱/۵ I_{b_۱}}{۹/۵۲} = ۱/۱۶ I_{b_۱}$

$\Rightarrow A_I = \frac{-۴۵/۴۵ I_{b_۲}}{R_{th}} =$

از طرفی: $I_{b_۲} = -۵۰ I_{b_۱} - \frac{h_{ie_۲} I_{b_۲}}{h_{oe}^{-۱}} - \frac{h_{ie_۲} I_{b_۲}}{۱۵} - \frac{h_{ie_۲} I_{b_۲}}{R'_{th}}$

$\Rightarrow I_{b_۲} = -۵۰ I_{b_۱} - \frac{۰/۴ I_{b_۲}}{۴۰} - \frac{۰/۴ I_{b_۲}}{۱۵} - \frac{۰/۴ I_{b_۲}}{۳/۶}$

$\Rightarrow -۵۰ I_{b_۱} = I_{b_۲} + ۰/۰۱ I_{b_۲} + ۰/۰۲۷ I_{b_۲} + ۰/۱۱ I_{b_۱} = -\frac{۱/۱۵}{۵۰} I_{b_۲}$

$\Rightarrow A_I = \frac{-۴۵/۴۵ I_{b_۲}}{۱/۱۶ \times \frac{-۱/۱۵}{۵۰} I_{b_۲}} = ۱۷۰۳/۵$

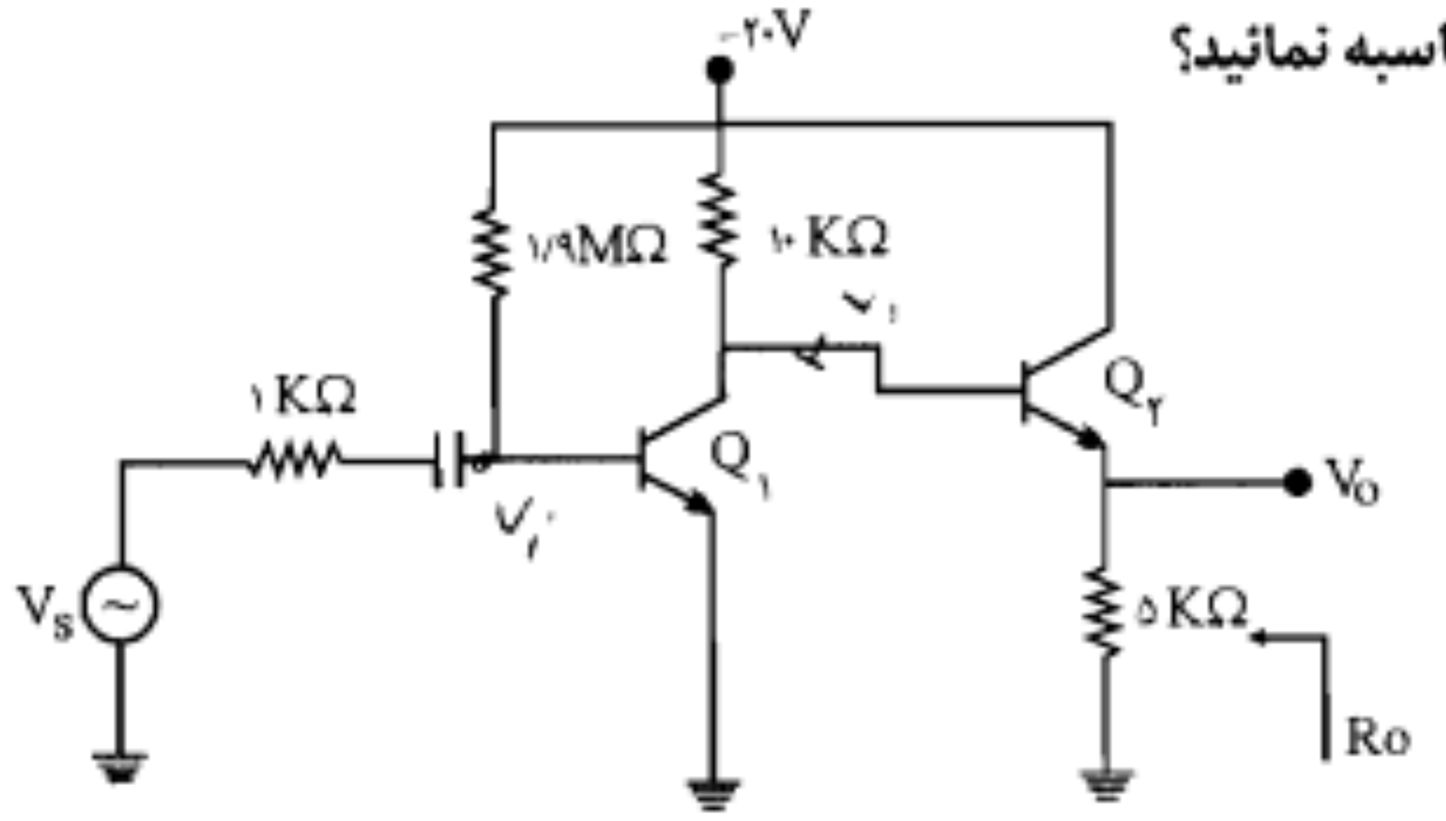
$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie_۱} = ۹/۲۵ K\Omega \parallel ۱/۵ K\Omega = \frac{۹/۵۲ \times ۱/۵}{۹/۵۲ + ۱/۵} = ۱/۳ \, K\Omega$

$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۱۷۰۳/۵ \times \frac{۴ K\Omega}{۱/۳ K\Omega} = ۵۲۴۱/۵ K\Omega$

$AV_s = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = ۵۲۴۱/۵ \times \frac{۱/۳}{۱/۳ + ۱} = ۲۹۶/۲۵$

$R_O = ۴ K\Omega \parallel h_{oe}^{-۱} = ۴ K\Omega \parallel ۴۰ K\Omega = \frac{۴ \times ۴۰}{۴ + ۴۰} = ۳/۶۴$

۲۳ـ در تقویت‌کننده در طبقه م-۲۳، $h_{fe_۱} = h_{fe_۲} = ۱۰۰$ و $h_{oe_۱}^{-۱} = h_{oe_۲}^{-۱} = ۴۰ K\Omega$ است. جریان نقطه کار ترانزیستورها، A_V و R_O را محاسبه نمائید؟



شکل م-۲۳

☑ **راه حل:**

در بیس $Q_۱$ KVL: $۱/۹ \times ۱۰^۳ I_{B_۱} = -V_{CC} - V_{BE_۱} \Rightarrow I_{B_۱} = \frac{۲۰ - ۰/۷}{۱/۹ \times ۱۰^۳} = ۰/۰۱۰۱۶ \, mA$

www.PnuEB.com

$\Rightarrow I_{C_1}=\beta_1 I_{B_1}=۱/۰۱۶\ mA \Rightarrow h_{ie_1}=\frac{h_{fe}V_T}{I_{C_1}}=\frac{۱۰۰\times ۲۶}{۱/۰۱۶}=۲/۵۶\ K\Omega$

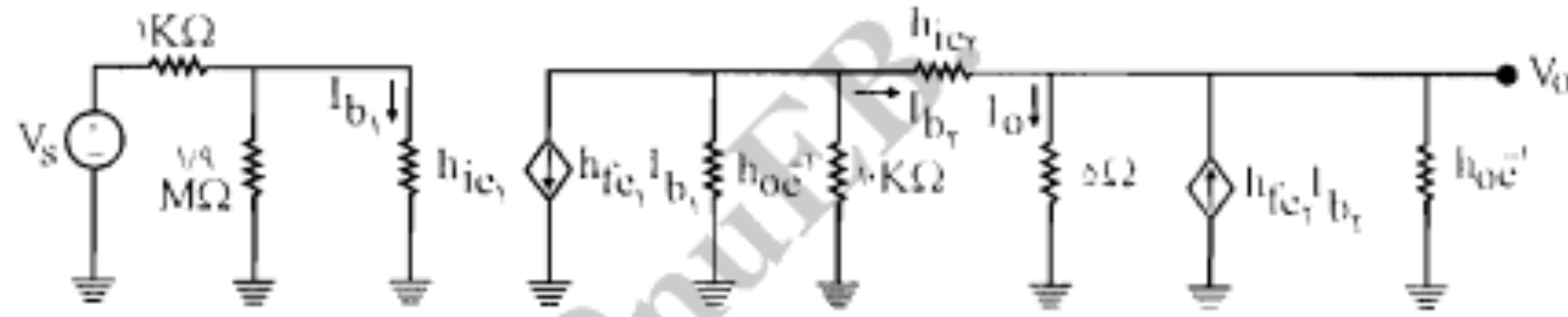
در بیس Q_2 KVL: $۱۰K\Omega(IC_1+I_{B_2})+۵K\Omega I_{E_2}=۲۰-۰/۷=۱۹/۳$

$\Rightarrow ۱۰K\Omega\times ۱/۰۱۶+۱۰\times I_{B_2}+۵\times(۱+\beta_2)I_{B_2}=۱۹/۳$

$\Rightarrow ۱۰/۱۶+۱۰I_{B_2}+۵\times ۱۰۱I_{B_2}=۱۹/۳\Rightarrow I_{B_2}=\frac{۹/۱۴}{۵۱۵}$

$I_{C_2}=\beta_2 I_{B_2}=۱/۷۷mA\Rightarrow h_{ie_2}=\frac{h_{fe}V_T}{I_{C_2}}=\frac{۱۰۰\times ۲۶}{۱/۷۷}=۱/۴۷K\Omega$

پس مدار معادل به صورت زیر در می‌آید:



$hoe^{-1}\parallel ۱۰K\Omega=۸K\Omega$

با استفاده از تقسیم جریان داریم:

$I_O=(I_{b_2}+h_{fe}I_{b_2})\times\frac{h_{oe}^{-1}}{h_{oe}^{-1}+۵K\Omega}=I_{b_2}\times ۱۰۱\times\frac{۴۰}{۴۰+۵}=۸۹/۸I_{b_2}$

دو مقاومت ۱۰ KΩ و $h_{oe^{-1}}$ موازی هستند پس مقاومت معادل آنها به صورت زیر می‌شود:

$h_{oe^{-1}}\parallel ۱۰K\Omega=\frac{۱۰\times ۴۰}{۱۰+۴۰}=۸K\Omega$

KVL: $۸K\Omega(h_{fe}I_{b_1}+I_{b_2})+۱/۴۷I_{b_2}+۵I_O=۰$

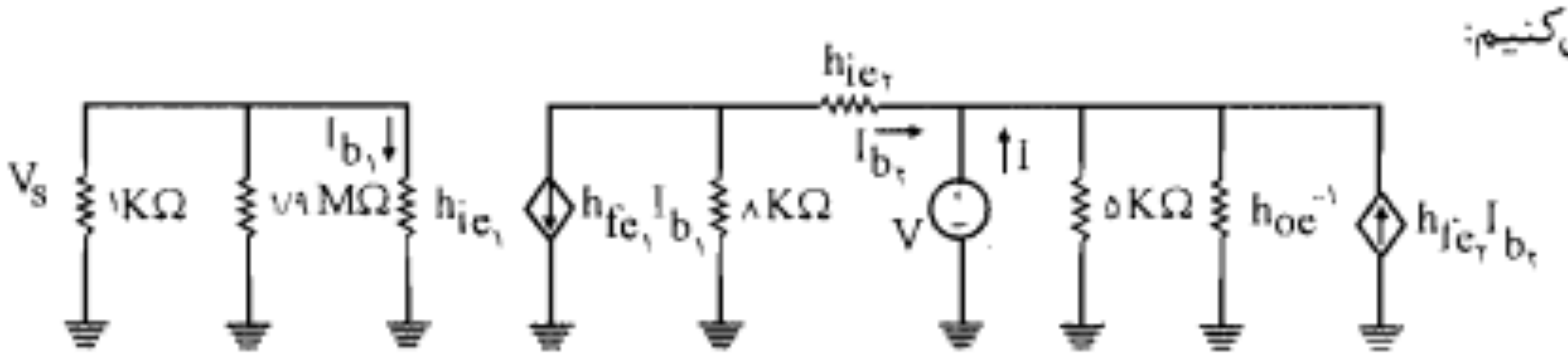
$\Rightarrow ۸۰۰I_{b_1}+۹/۴۷I_{b_2}+۵\times ۸/۹۸I_{b_2}=۰$

$\Rightarrow I_{b_1}=-۰/۵۷۳I_{b_2}$

$\Rightarrow A_V=\frac{V_O}{V_i}=\frac{۵I_O}{h_{ie_1}\times I_{b_1}}=\frac{۵\times ۸۹/۸I_{b_2}}{۲/۵۶\times(-۰/۵۷۳)I_{b_2}}=-۳۰۶/۴$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را موازی با مقاومت ۵KΩ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ

V_s را صفر می‌کنیم:



$I=\frac{V}{h_{oe^{-1}}}+\frac{V}{۵K\Omega}+(-I_{b_2})-h_{fe}I_{b_2}=V(\frac{۱}{۴۰}+\frac{۱}{۵})-I_{b_2}-۱۰۰I_{b_2}$

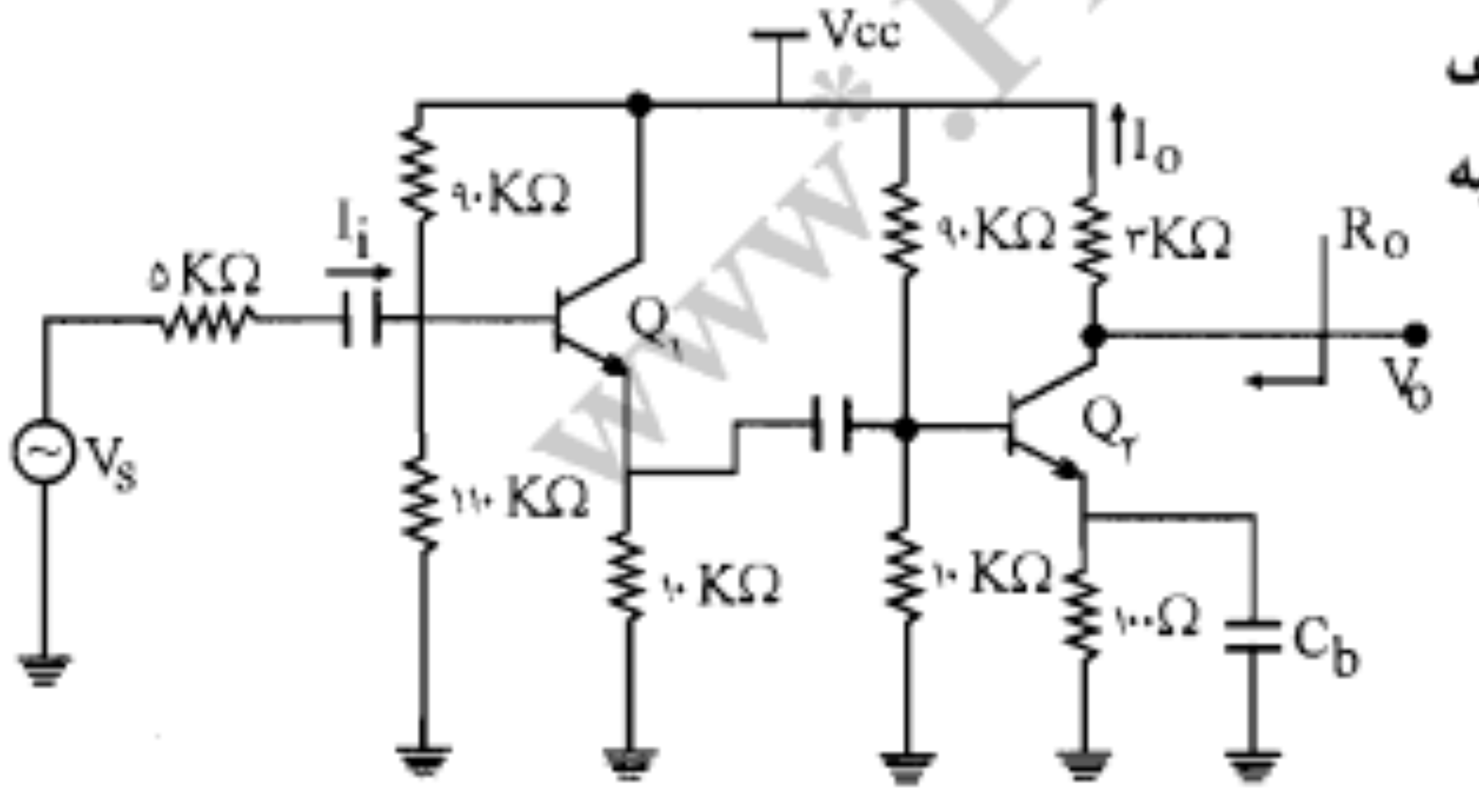
در حلقه ۸KΩ و hie۲ و V یک KVL می‌زنیم: KVL: $۸I_{b_2}+h_{ie_2}I_{b_2}=-V$

$\Rightarrow I_{b_2}=\frac{-V}{۸+۱/۴۷}=\frac{-V}{۹/۴۷}$

$\Rightarrow I=V(\frac{۴۵}{۴۰\times ۵})-(\frac{-V}{۹/۴۷})-۱۰۰\times(\frac{-V}{۹/۴۷})=V(۰/۲۲۵+۰/۱۰۶+۱۰/۵۶)$

$\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=\frac{۱}{۱۰/۸۹۱}=۹۲\Omega$

۲۴ ـ در مدار شکل م ـ ۲۴ برای هر دو ترانزیستور $h_{ie}=۳K\Omega$، $h_{fe}=۱۰۰$ و $h_{re}=h_{oe}\cong ۰$ است. مقاومت‌های ورودی و خروجی و بهره‌های جریان و ولتاژ را محاسبه کنید؟



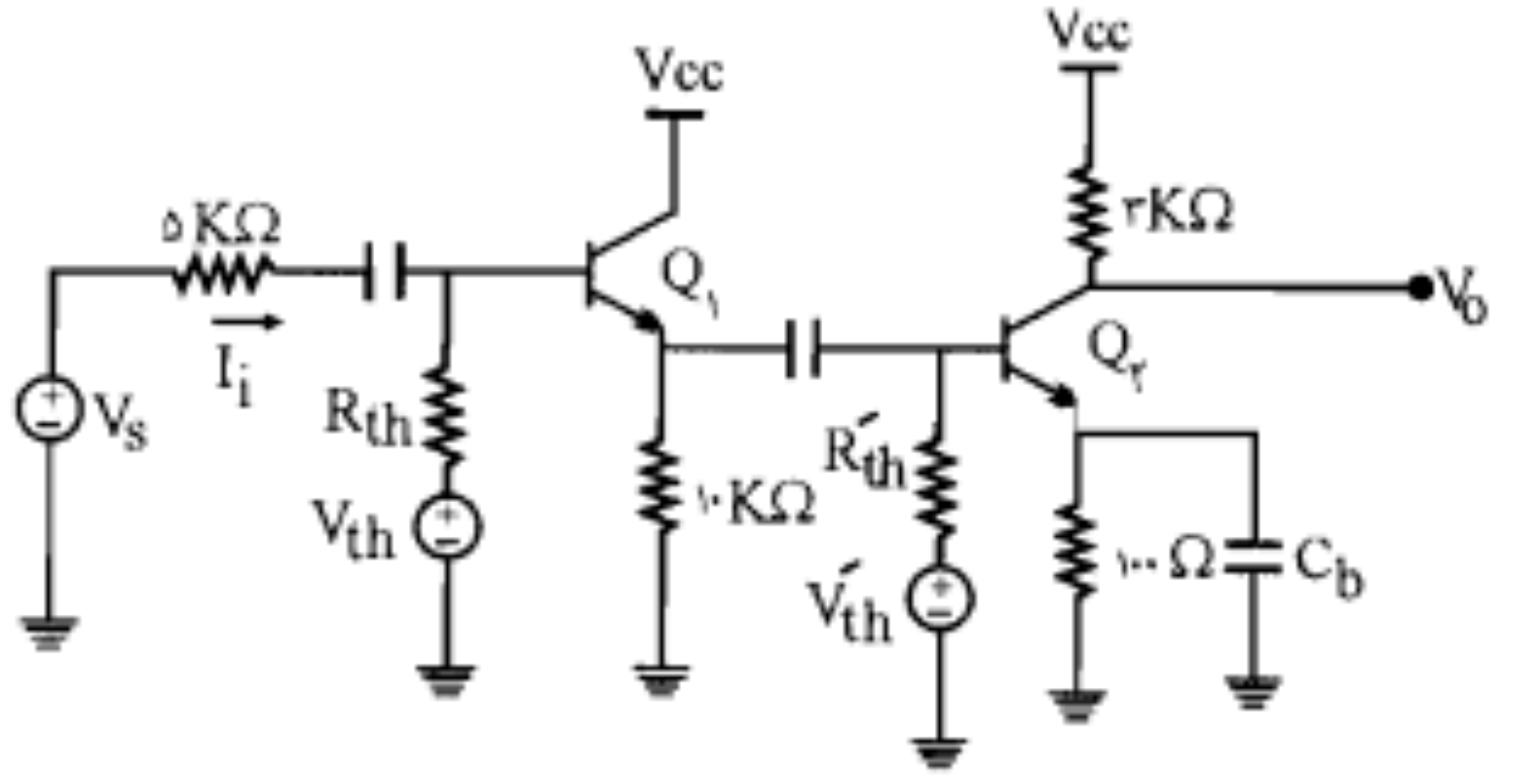
شکل م– ۲۴

☑ **راه حل:**

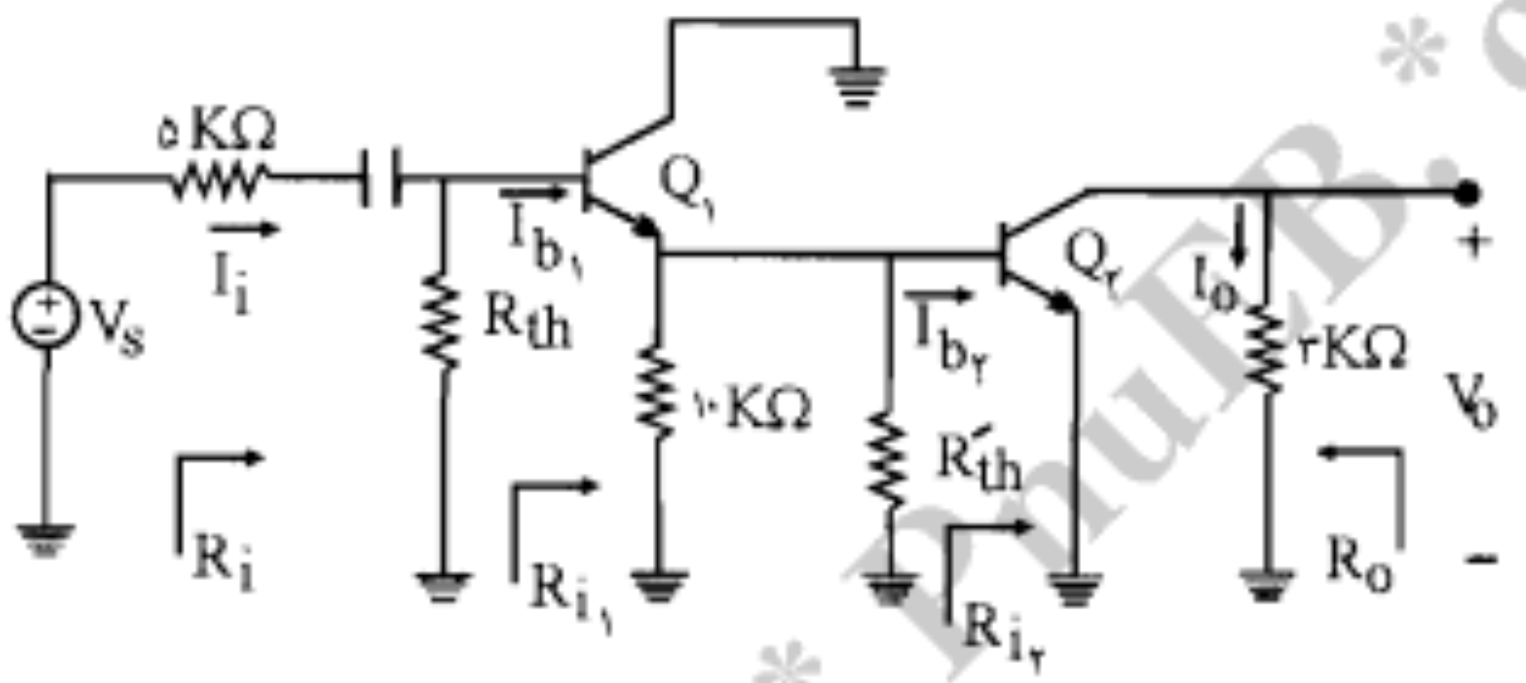
$$Q_1:\begin{cases}R_{th}=۱۱۰K\Omega\parallel ۹۰K\Omega=\frac{۱۱۰\times ۹۰}{۱۱۰+۹۰}=۴۹/۵K\Omega\\ V_{th}=V_{CC}\times\frac{۱۱۰K\Omega}{۱۱۰+۹۰}=۰/۵۵V_{CC}\end{cases}$$

$$Q_2:\begin{cases}R'_{th}=۱۰K\Omega\parallel ۹۰K\Omega=\frac{۱۰\times ۹۰}{۱۰+۹۰}=۹K\Omega\\ V'_{th}=V_{CC}\times\frac{۱۰}{۱۰+۹۰}=۰/۱V_{CC}\end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر در می‌آید:



مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



$R_O = R_{L_۲} = ۳K\Omega$

$R_i = R_{th} \| R_{i_۱}$ (I) $\quad R_{i_۱} = h_{ie_۱} + (۱+h_{fe})R_{L_۱}$ (II)

$R_{L_۱} = R'_{th} \| ۱۰K\Omega \| R_{i_۲}$, $\quad R_{i_۲} = h_{ie_۲} = ۳K\Omega$

$$\Rightarrow R_{L_۱} = ۹K\Omega \| ۱۰K\Omega \| ۳K\Omega = \left(\frac{۹\times ۱۰}{۹+۱۰}\right) \| ۳K\Omega = \frac{۹۰}{۱۹} \| ۳ = \frac{\frac{۹۰}{۱۹}\times ۳}{\frac{۹۰}{۱۹}+۳} = \frac{\frac{۲۷۰}{۱۹}}{\frac{۱۴۷}{۱۹}} = ۱/۸۴\ K\Omega$$

$$(II): R_i = h_{ie_۱} + (۱+h_{fe})R_{L_۱} = ۳K\Omega + (۱+۱۰۰)\times ۱/۸۴ = ۱۸۸/۸۴\ K\Omega$$

$$(I): R_{i_۱} = R_{th} \| R_{i_۱} = ۴۹/۵\ K\Omega \| ۱۸۸/۸۴\ K\Omega = ۳۹/۲۲ K\Omega$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_o}{I_{b_۲}} \times \frac{I_{b_۲}}{I_{e_۱}} \times \frac{I_{e_۱}}{I_{b_۱}} \times \frac{I_{b_۱}}{I_i} = A_{I_۲} \times A_{I_۱} \times \frac{I_{b_۲}}{I_{e_۱}} \times \frac{I_{b_۱}}{I_i} \qquad (III)$$

$$\begin{cases} A_{I_۲} = \dfrac{I_O}{Ib_۲} = -h_{fe} = -۱۰۰ \\ A_{I_۱} = \dfrac{Ie_۱}{Ib_۱} = ۱+h_{fe} = ۱+۱۰۰ = ۱۰۱ \\ \dfrac{I_{b_۲}}{I_{e_۱}} = \dfrac{Ie_۱ \times \frac{۱}{Ri_۲}}{\frac{۱}{Ri_۲} + \frac{۱}{۱۰K\Omega} + \frac{۱}{۹۰ \| ۱۰K\Omega}} \times \dfrac{۱}{Ie_۱} = \dfrac{\frac{۱}{۳}}{\frac{۱}{۳}+\frac{۱}{۱۰}+\frac{۱}{۹}} = \dfrac{۳۰}{۴۹} \\ \dfrac{I_{b_۱}}{I_i} = \dfrac{I_i \times (۹۰ \| ۱۰K\Omega)}{(۹۰ \| ۱۰K\Omega) + R_{i_۱}} \times \dfrac{۱}{I_i} = \dfrac{۴۹/۵}{۴۹/۵ + ۱۸۸/۸۴} = ۰/۲۱ \end{cases}$$

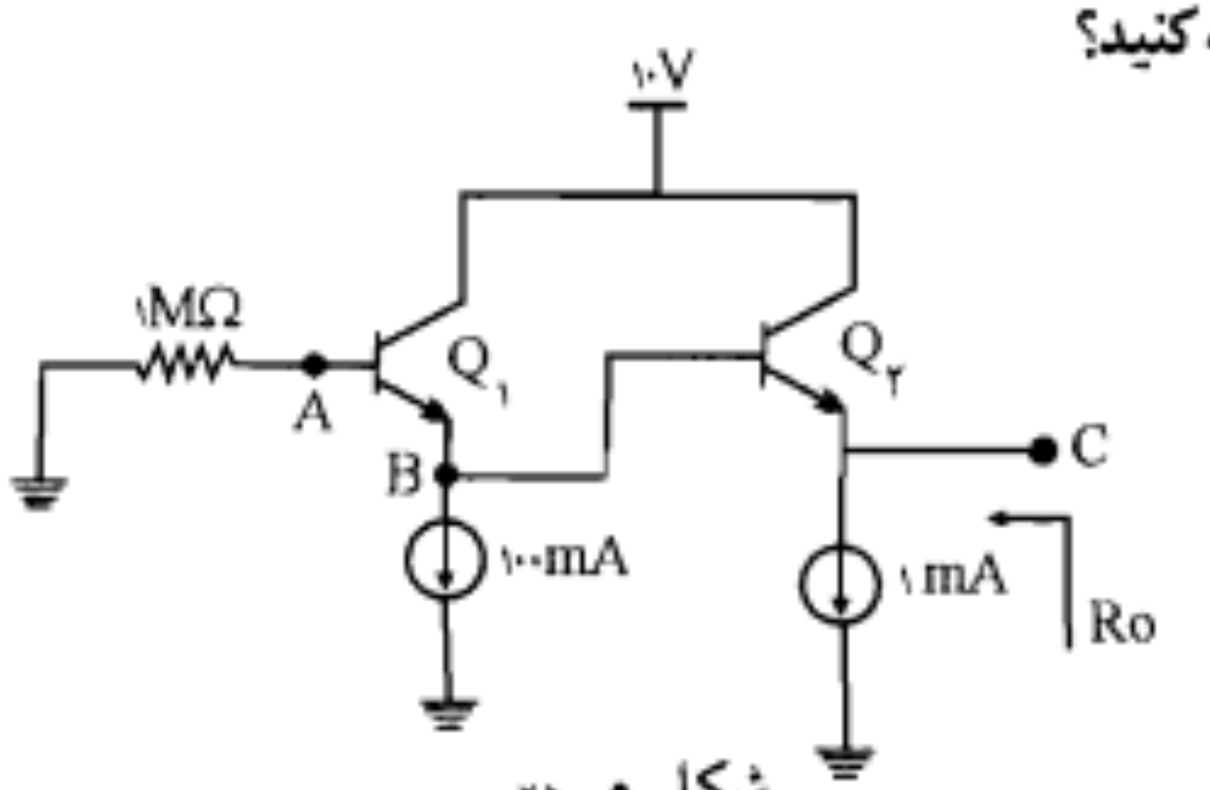
$$(III) = AI = -۱۰۰ \times ۱۰۱ \times \frac{۳۰}{۴۹} \times ۰/۲۱ = -۱۲۹۸/۵۷$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{Vb_۲} \times \frac{V_{b_۲}}{V_{b_۱}} = \frac{V_O}{V_{b_۲}} \times \frac{V_{e_۱}}{V_{b_۱}} = A_{V_۲} \times A_{V_۱}$$

$$\begin{cases} A_{V_۱} = \dfrac{V_{e_۱}}{V_{b_۱}} = A_{I_۱} \times \dfrac{R_{L_۱}}{R_{i_۱}} = ۱۰۱ \times \dfrac{۱/۸۴}{۱۸۸/۸۴} = ۰/۹۸ \\ A_{V_۲} = A_{I_۲} \times \dfrac{R_{L_۲}}{R_{i_۲}} = -۱۰۰ \times \dfrac{۳}{۳} = -۱۰۰ \end{cases} \Rightarrow A_V = A_{V_۱} \times A_{V_۲} = ۰/۹۸ \times (-۱۰۰) = -۹۸$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۹۸ \times \frac{۳۹/۲۲}{۳۹/۲۲ + ۵} = -۸۶/۹$$

۲۵ـ در مدار شکل م ـ ۲۵، با فرض $V_{BE} = ۰/۷V$ و $\beta = ۱۰۰$، ولتاژهای DC نقاط A، B و C را به دست آورید. مقاومت خروجی R_O را نیز محاسبه کنید؟



شکل م-۲۵

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

$$I_{E_۱} = ۱۰۰\mu A + I_{B_۲} = ۱۰۰\mu A + \frac{I_{E_۲}}{۱+\beta_۲} = ۱۰۰\mu A + \frac{۱۰۰۰\mu A}{۱+۱۰۰} = ۱۱۰\mu A$$

$$V_A = -۱M\Omega \times I_{B_۱} = -۱۰^۳ \times \frac{I_{E_۱}}{۱+\beta} = -۱۰^۳ \times \frac{۱۱۰\mu A}{۱۰۱} \times ۱۰^{-۳} = -۱/۰۹\,V$$

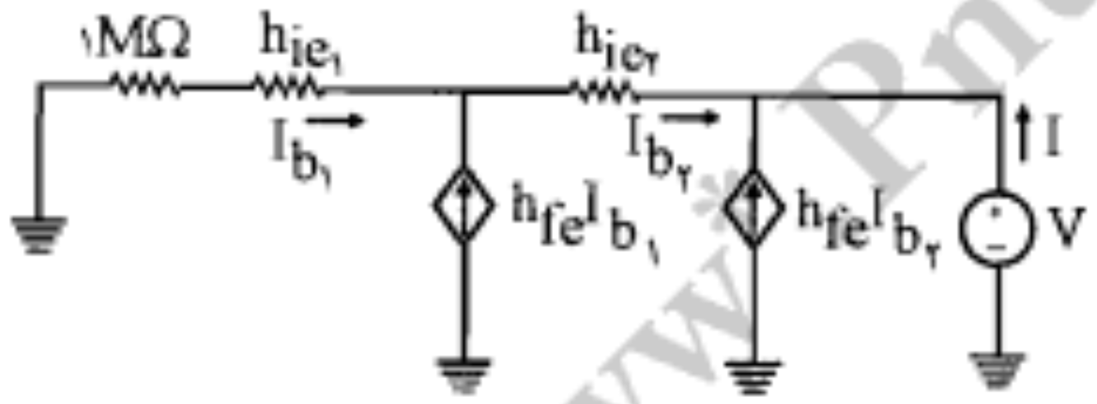
$$V_B = V_A - V_{BE} = -۱/۰۹ - ۰/۷ = -۱/۷۹\,V$$

$$V_C = V_B - V_{BE_۲} = -۱/۷۹ - ۰/۷ = -۲/۴۹\,V$$

$$I_{E_۱} = ۱۱۰\mu A \Rightarrow h_{ie_۱} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۱}} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶}{\frac{I_{E_۱}(\beta_۱)}{(۱+\beta_۱)}} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶ \times ۱۰۱}{۱۱۰ \times ۱۰^{-۳} \times ۱۰۰} = ۲۳/۸۷ K\Omega$$

$$I_{E_۲} = ۱mA \Rightarrow h_{ie_۲} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۲}} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶}{\frac{۱mA \times (۱۰۰)}{۱۰۱}} = ۲/۶۳\,K\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر می‌شود: برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم:



$$I = -h_{fe} I_{b_۲} - I_{b_۲} = -(۱+h_{fe}) I_{b_۲} = -۱۰۱ I_{b_۲} \qquad (I)$$

$$I_{b_۲} = I_{b_۱} + h_{fe} I_{b_۱} = (۱+h_{fe}) I_{b_۱}$$

$$KVL: ۱ \times ۱۰^۳ K\Omega\, I_{b_۱} + h_{ie_۱} I_{b_۱} + h_{ie_۲} I_{b_۲} = -V$$

$$\Rightarrow I_{b_۱}(۱۰^۳ + h_{ie_۱}) + h_{ie_۲}(۱+h_{fe}) I_{b_۱} = -V$$

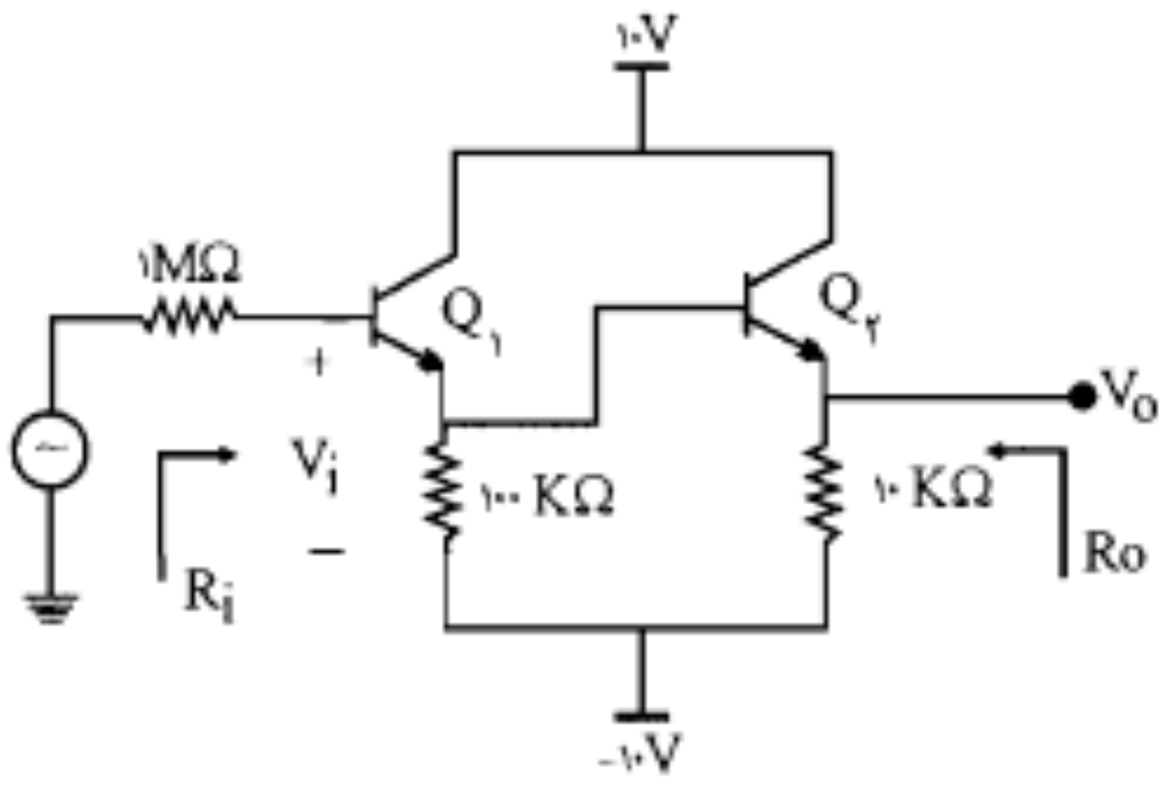
$$\Rightarrow I_{b_۱} = \frac{-V}{۱۲۸۹/۵}$$

باکمک رابطه (I) داریم:

$$I = -۱۰۱ I_{b_۲} = -۱۰۱ \times (۱+h_{fe}) I_{b_۱} = -۱۰۱ \times ۱۰۱ I_{b_۱} = -(۱۰۱)^۲ I_{b_۱}$$

$$= -(۱۰۱)^۲ \times \frac{-V}{۱۲۸۹/۵} \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱۲۸۹/۵}{(۱۰۱)^۲} = ۱۲۶\,\Omega$$

۲۶ـ در مدار شکل م ـ ۲۶ با فرض $V_{BE} = ۰/۷۷$، $۱۰۰ = B$ و $V_{CE(sat)} = ۰/۲V$، ولتاژ DC خروجی، حداکثر دامنه بدون اعوجاج خروجی و مقادیر A_V، R_O و R_I را محاسبه نمائید؟



شکل م_۲۶

☑ **راه حل:**

تحلیل dc انجام می‌دهیم و در تحلیل dc، V_s صفر می‌شود:

در حلقه ۱MΩ و ۱۰۰KΩ و $V_{BE_۱}$ و ۱۰V داریم:

$$KVL: ۱۰^۳ I_{B_۱} + ۱۰۰(I_{E_۱} - I_{B_۲}) = ۱۰ - V_{BE_۱}$$

$$\Rightarrow ۱۰^۳ I_{B_۱} + ۱۰۰(\beta+۱) I_{B_۱} - ۱۰۰ I_{B_۲} = ۱۰ - ۰/۷ = ۹/۳$$

$$\Rightarrow ۱۱۱۰۰ I_{B_۱} - ۱۰۰ I_{B_۲} = ۹/۳ \quad (I)$$

در حلقه ۱۰۰KΩ و $V_{BE_۲}$ و ۱۰KΩ داریم:

$$KVL: ۱۰۰(I_{E_۱} - I_{B_۲}) + ۱۰(I_{E_۲}) = V_{BE_۲} = ۰/۷$$

$$\Rightarrow ۱۰۰(۱+\beta) I_{B_۱} - ۱۰۰ I_{B_۲} - ۱۰(۱+\beta) I_{B_۲} = ۰/۷$$

$$\Rightarrow ۱۰۱۰۰ I_{B_۱} - ۱۱۱۰ I_{B_۲} = ۰/۷ \quad (II)$$

با استفاده از حل این دستگاه $I_{B_۱}$ و $I_{B_۲}$ محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} ۱۱۱۰۰ I_{B_۱} - ۱۰۰ I_{B_۲} = ۹/۳ & (I) \\ ۱۰۱۰۰ I_{B_۲} - ۱۱۱۰ I_{B_۲} = ۰/۷ & (II) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{B_۱} = ۰/۹۱\mu A \\ I_{B_۲} = ۷/۶\mu A \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{C_۱} = \beta I_{B_۱} = ۰/۰۹۱\,mA \\ I_{C_۲} = \beta I_{B_۲} = ۰/۷۶\,mA \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_{ie_۱} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۱}} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶}{۰/۰۹۱} = ۲۸/۶\,K\Omega \\ h_{ie_۲} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۲}} = \frac{۱۰۰ \times ۲۶}{۰/۷۶} = ۳/۴\,K\Omega \end{cases}$$

www.PnuEB.com

$V_{O_{dc}} = V_{E_۲} = ۱۰ I_{E_۲} - ۱۰V = ۱۰(I_{C_۲}) - ۱۰ V = ۱۰ \times ۰/۷۶ - ۱۰ = -۲/۴ V$

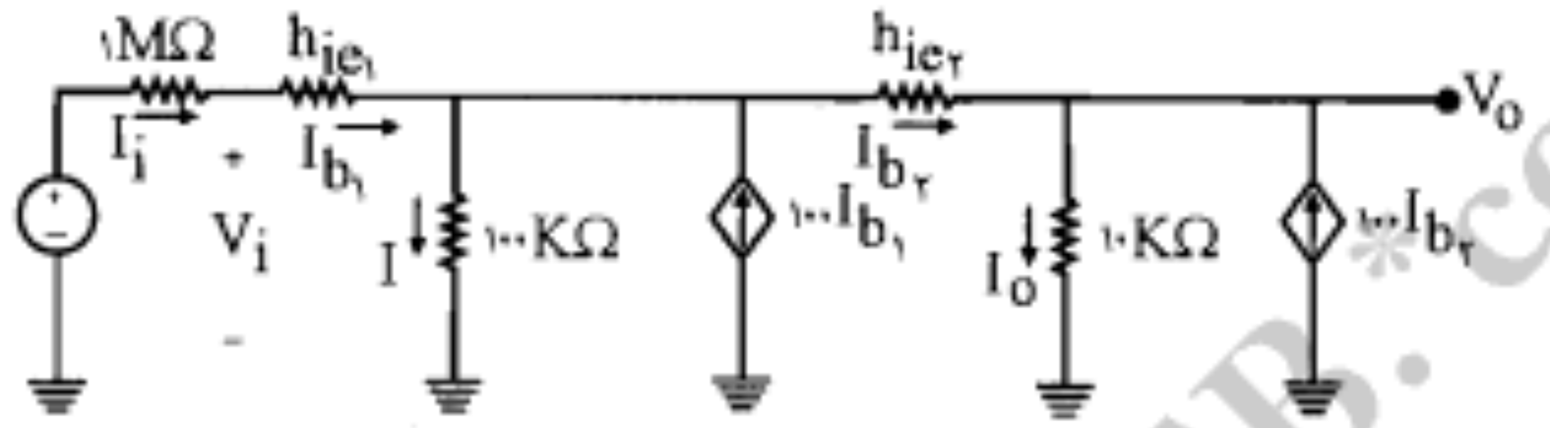
$V_O(max) = ۱۰ - ۰/۲ = ۹/۸ V$

V_O در حالت اشباع $Q_۲$ برابر است با: $V_{O_۱} = V_O(max) - V_O = ۹/۸ - (-۲/۴) = ۱۲/۲$

V_O درحالت قطع $Q_۲$ برابر ۱۰ V -می‌باشد ⇐ $V_{O_۲} = V_O(min) - V_O = -۱۰ - (-۲/۴) = -۷/۶$

$V_O(max)$ برابر کمترین مقدار از نظر قدرمطلق می‌باشد ⇐ $V_O(max) = ۷/۶$

مدار معادل ac:



$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_{b_۲} + ۱۰۰ b_۲}{I_{b_۱}} = \frac{۱۰۱ b_۲}{I_{b_۱}} \quad (I)$$

$I_{b_۱} = ?$ KVL: $-۱۰۰ I + ۳/۴ I_{b_۲} + ۱۰ I_O = ۰ \Rightarrow$

$$-۱۰۰(I_{b_۱} + ۱۰۰ I_{b_۱} - I_{b_۲}) + ۳/۴ I_{b_۲} + ۱۰۱ I_{b_۲} \times ۱۰ = ۰$$

$$\Rightarrow -۱۰۱۰۰ I_{b_۱} + ۱۰۰ I_{b_۲} + ۳/۴ I_{b_۲} + ۱۰۱۰ I_{b_۲} = ۰ \Rightarrow I_{b_۱} = ۰/۱۱۰۲ I_{b_۲}$$

$$(I): A_I = \frac{۱۰۱ I_{b_۲}}{۰/۱۱۰۲ I_{b_۲}} = ۹۱۶/۵$$

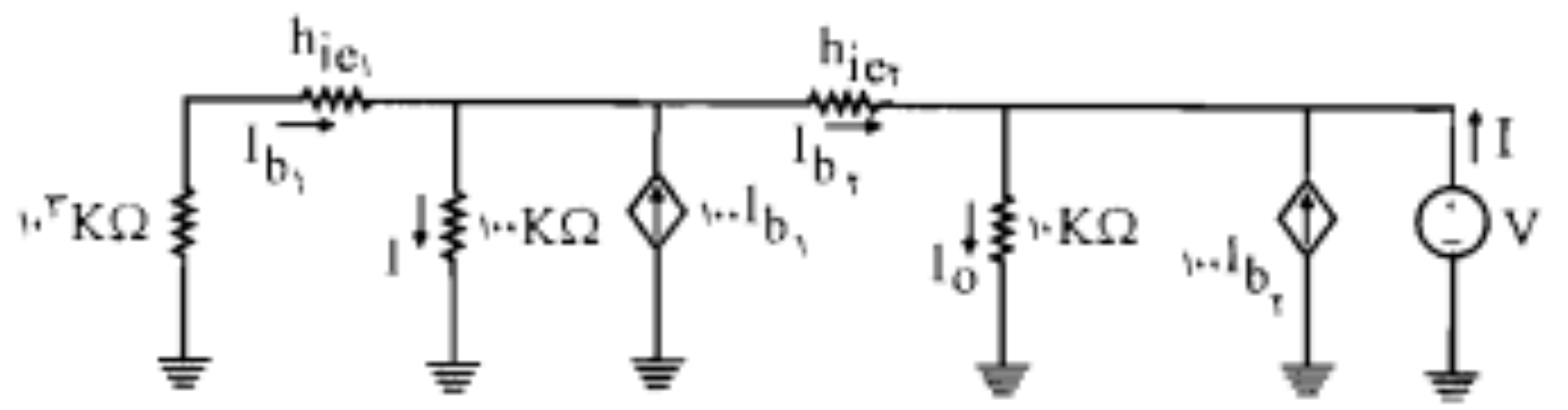
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie_۱} I_{b_۱} + ۳/۴ I_{b_۲} + ۱۰ I_O}{I_{b_۱}} = \frac{۲۸/۶ \times ۰/۱۱۰۲ I_{b_۲} + ۳/۴ I_{b_۲} + ۱۰ \times ۱۰۱ I_{b_۲}}{۰/۱۱۰۲ I_{b_۲}}$$

$$= ۹/۲۲۴ M\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۹۱۶/۵ \times \frac{۱۰ K\Omega}{۹/۲۲۴ \times ۱۰^۳} = ۰/۹۹۳$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = ۰/۹۹۳ \times \frac{۹/۲۲۴ \times ۱۰^۳}{۹/۲۲۴ \times ۱۰^۳ + ۱۰^۳} = ۰/۸۹$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می‌کنیم.



$$R_O = \frac{V}{I} \qquad I = -۱۰۰ I_{b_۲} - I_{b_۲} + I_O = -۱۰۱ I_{b_۲} + \frac{V}{۱۰} \quad (I)$$

$$KVL: I_{b_۱} - I\,۱۰۰ K\Omega + ۱۰۰ I_{b_۱} = I_{b_۲} \Rightarrow I_{b_۱} + \frac{(۱۰^۳ + h_{ie_۱}) I_{b_۱}}{۱۰۰} + ۱۰۰ I_{b_۱} = I_{b_۲}$$

$$\Rightarrow I_{b_۲} = ۱۱۱/۲۹ I_{b_۱} \quad (II)$$

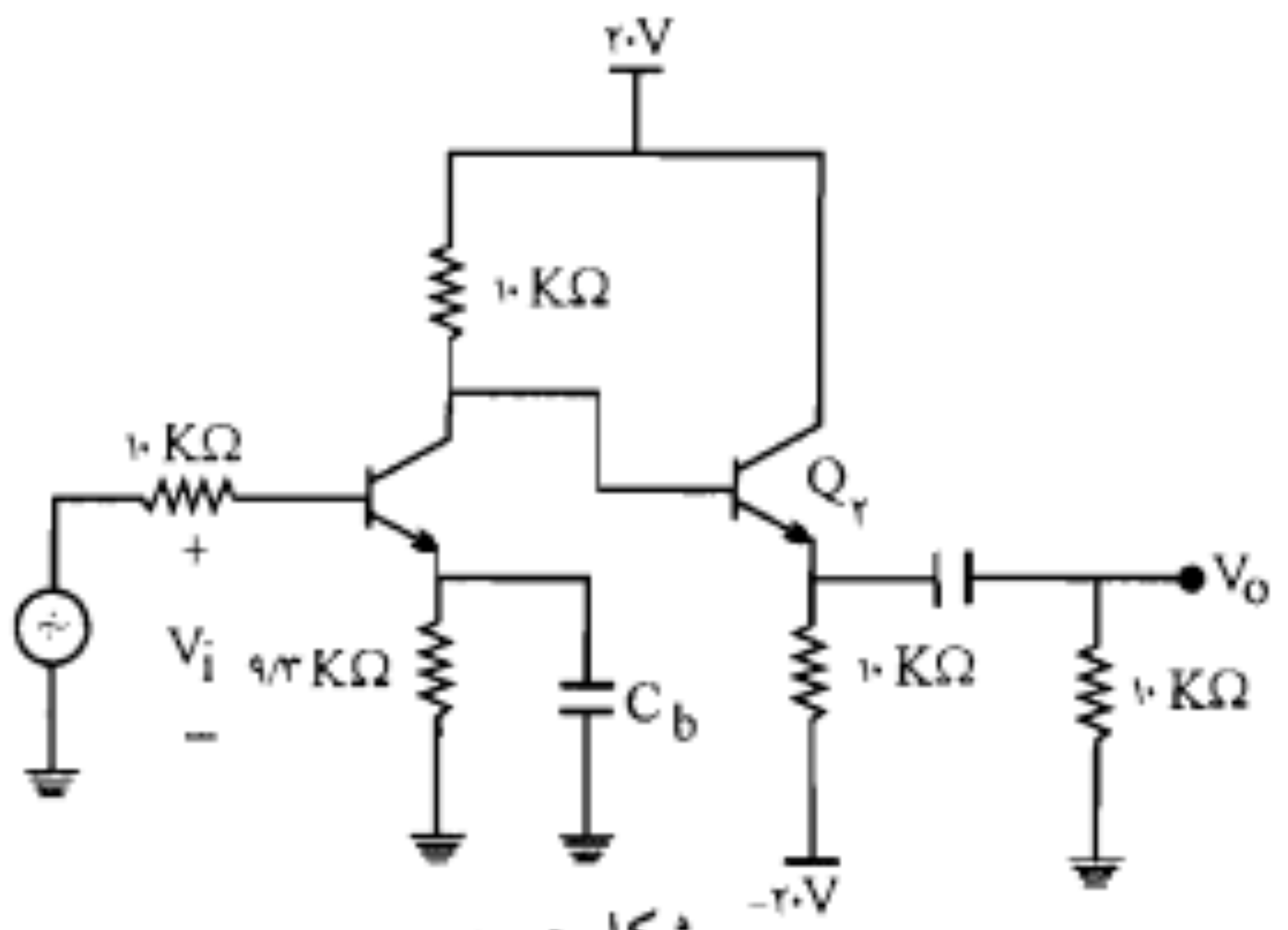
$$KVL: (h_{ie_۱} + ۱۰^۳) I_{b_۱} + ۳/۴ I_{b_۲} = -V \Rightarrow$$

$$۱۰۲۸/۶ \times \frac{۱}{۱۱۱/۲۹} I_{b_۲} + ۳/۴ I_{b_۲} = -V \Rightarrow I_{b_۲} = \frac{-V}{۱۲/۶}$$

$$\Rightarrow (I): I = -۱۰۱ \times \frac{-V}{۱۲/۶} + \frac{V}{۱۰} = V(۰/۱ + ۸/۰۱) = ۸/۱۱ V$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۸/۱۱} = ۱۲۳\Omega$$

۲۷- در مدار شکل م-۲۷، $V_{BE} = ۰/۷V$ و $\beta = ۵۰$، مقادیر A_{V_s}، R_i، R_O و A_I را به دست آورید؟



شکل م-۲۷

☑ **راه حل:**

در حلقه ۱۰ KΩ و ۹/۳KΩ و V_{BE_1} و ۲۰V در Q_1 داریم:

$$KVL:\ ۱۰ I_{B_1}+۹/۳ I_{E_1}=۲۰-۰/۷=۱۹/۳ \Rightarrow ۱۰ I_{B_1}+۹/۳(۱+\beta) I_{B_1}=۱۹/۳$$

$$\Rightarrow ۴۸۴/۳\, I_{B_1}=۱۹/۳ \Rightarrow I_{B_1}=۰/۰۳۹ \Rightarrow I_{C_1}=\beta I_{B_1}=۱/۹۹\,mA$$

$$\Rightarrow h_{ie_1}=\frac{h_{fe}V_T}{I_{C_1}}=\frac{۵۰\times ۲۶}{۱/۹۹}=۶۵۳/۳\Omega=۰/۶۵۳\,K\Omega$$

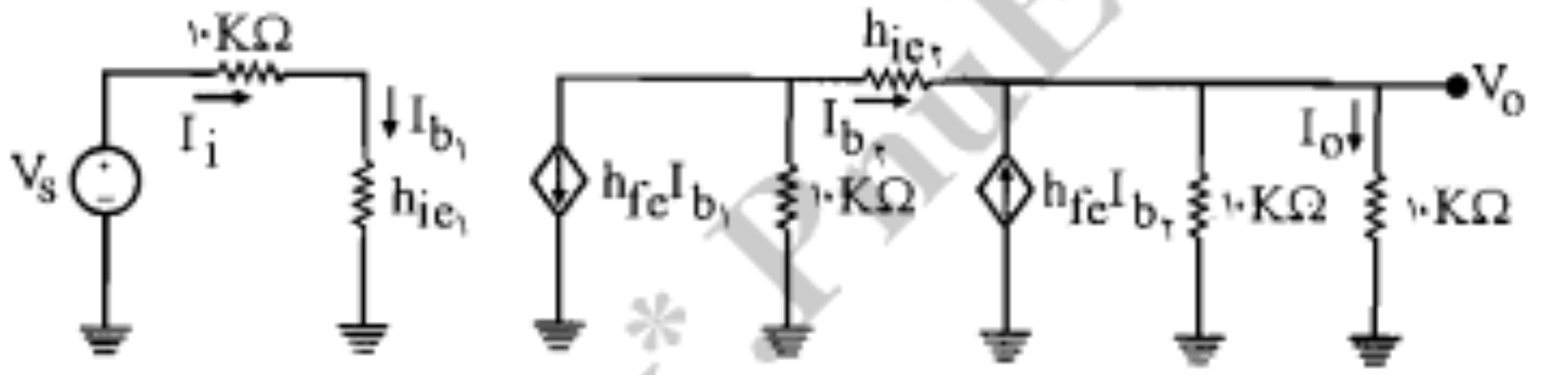
در حلقه ۱۰ KΩ و ۲۰ V و ۱۰ KΩ و ۲۰ V- داریم:

$$KVL:\ ۱۰\,K\Omega(I_{C_1}+I_{B_2})+۱۰ I_{E_2}=۲۰-(-۲۰)-۰/۷=۳۹/۳$$

$$\Rightarrow ۱۰(۱+\beta)I_{B_1}+۱۰ I_{B_2}+۱۰(۱+\beta)I_{B_2}=۳۹/۳ \Rightarrow ۵۲۰ I_{B_2}=۳۹/۳-۱۰\times ۱/۹۹$$

$$\Rightarrow I_{B_2}=۰/۰۳۷ \Rightarrow I_{C_2}=۱/۸۶\,mA \Rightarrow h_{ie_2}=\frac{h_{fe}V_T}{I_{C_2}}=\frac{۵۰\times ۲۶}{۱/۸۶}=۰/۶۹۹\,K\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر می‌شود:



$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{(h_{fe}I_{b_2}+I_{b_2})\times\frac{۱۰K\Omega}{۱۰K\Omega+۱۰K\Omega}}{I_{b_1}}=\frac{۵۱ I_{b_2}\times\frac{۱}{۲}}{I_{b_1}} \quad (I)$$

$$KVL:\ ۱۰\,K\Omega(۵۰ I_{b_1}+I_{b_2})+h_{ie_2}I_{b_2}+(۱۰\,K\Omega \parallel ۱۰\,K\Omega)\times(I_{b_2}+h_{fe}I_{b_2})=۰$$

$$\Rightarrow ۵۰۰ I_{b_1}+۱۰ I_{b_2}+۵۰ I_{b_2}+(۵\times ۵۱)I_{b_2}=۰$$

$$\Rightarrow I_{b_1}=\frac{-۲۶۵/۶۹۹}{۵۰۰}I_{b_2}$$

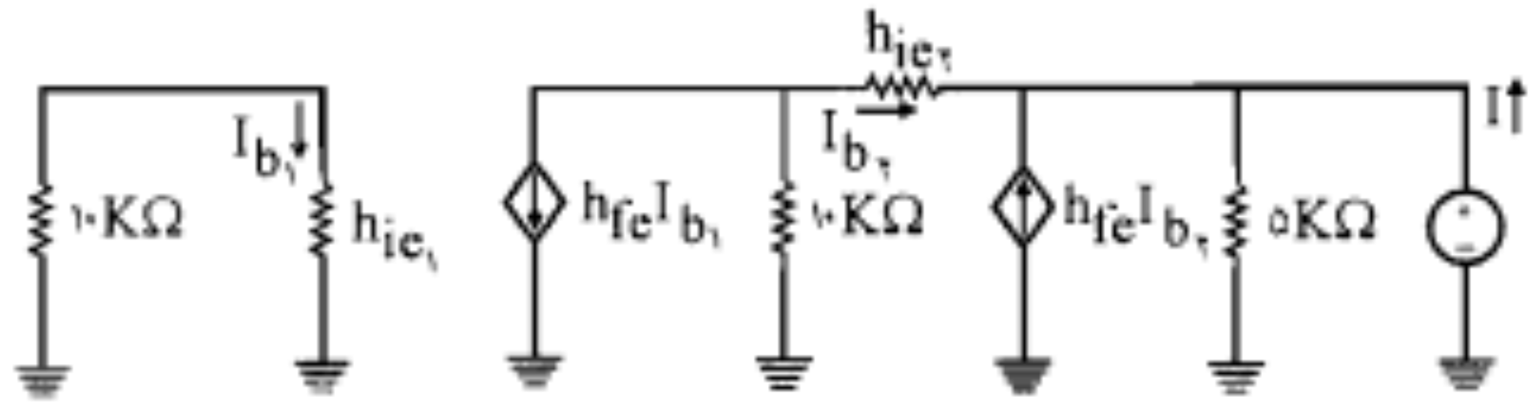
$$(I):A_I=\frac{\frac{۵۱}{۲}I_{b_2}}{\frac{-۲۶۵/۶۹۹}{۵۹۹}I_{b_2}}=-۴۷/۹۸$$

$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=h_{ie_1}=۰/۶۵۳\,K\Omega$$

$$A_V=A_I\times\frac{R_L}{R_i}=-۴۷/۹۸\times\frac{۱۰\,K\Omega}{۰/۶۵۳}=۷۳۵$$

$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=۷۳۵\times\frac{۰/۶۵۳}{۰/۶۵۳+۱۰}=-۴۵/۰۵$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V در خروجی موازی با مقاومت ۱۰ KΩ قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم:



$$R_O=\frac{V}{I} \quad , \quad I=\frac{V}{۵}-h_{fe}I_{b_2}-I_{b_2}=\frac{V}{۵}-I_{b_2} \quad (II)$$

در حلقه ۱۰ KΩ و h_{ie_2} و V داریم:

$$KVL:\ (۱۰+h_{ie_2})I_{b_2}=-V$$

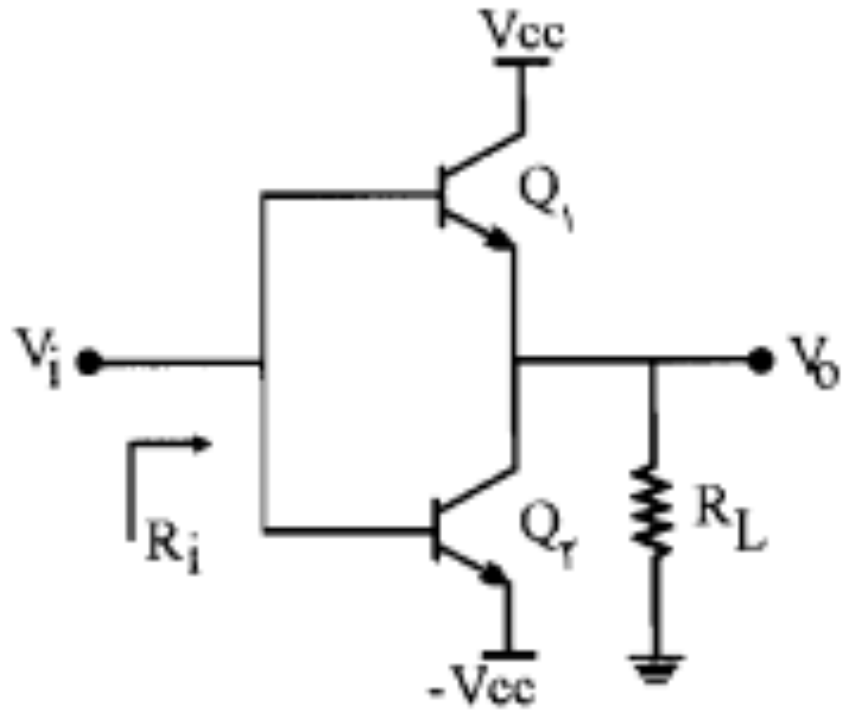
$$\Rightarrow (۱۰+۰/۶۹۹)I_{b_2}=-V \Rightarrow I_{b_2}=\frac{-V}{۱۰/۶۹۹}$$

$$\Rightarrow (II): I=\frac{V}{۵}-۵۱\times\frac{-V}{۱۰/۶۹۹}=V(\frac{۱}{۵}+\frac{۵۱}{۱۰/۶۹۹})=۴/۹۷V$$

$$\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=\frac{۱}{۴/۹۷}=۰/۲۰۱\,K\Omega$$

۲۸ ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۲۸ پارامترهای هر دو ترانزیستور مشابه‌اند. مقادیر A_V و R_i را بر حسب پارامترهای هیبرید h ترانزیستور محاسبه نمائید. ($h_{re}=h_{oe}=0$)

☑ **راه حل:**



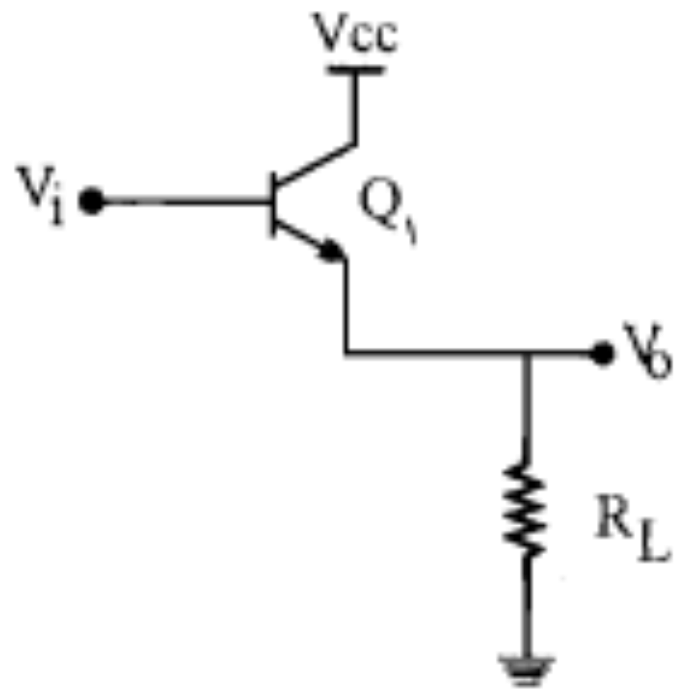
شکل م ـ ۲۸

www.*PnuEB*.com

در این مدار هر دو ترانزیستور با هم نمی‌توانند روشن باشند اگر $Q_۱$ روشن باشد $Q_۲$ خاموش می‌باشد و اگر $Q_۲$ روشن باشد $Q_۱$ خاموش می‌باشد.

$$\begin{cases} Q_۱ : ON \\ Q_۲ : Off \end{cases}$$

مدار را وقتی که $Q_۱$ روشن و $Q_۲$ خاموش می‌باشد رسم می‌کنیم:



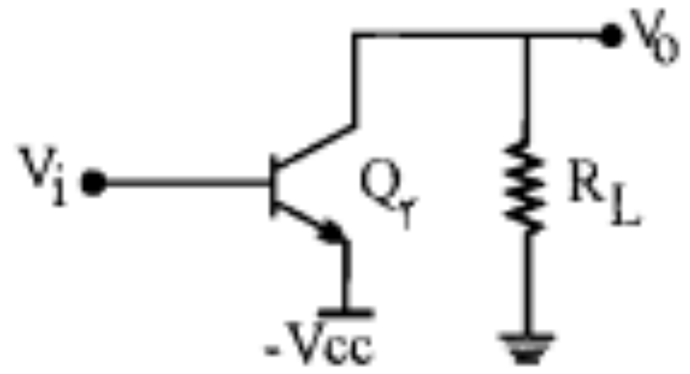
$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} \quad و \quad \begin{cases} R_i = h_{ie} + (۱+h_{fe})R_L \\ A_I = ۱+h_{fe} \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_V = (۱+h_{fe}) \times \frac{R_L}{\left[h_{ie} + (۱+h_{fe})R_L\right]} = \frac{(۱+h_{fe})R_L}{\left[h_{ie} + (۱+h_{fe})R_L\right]}$$

$$\Rightarrow A_V = (۱+h_{fe}) \times \frac{R_L}{\left[h_{ie} + (۱+h_{fe})R_L\right]} = \frac{(۱+h_{fe})R_L}{\left[h_{ie} + (۱+h_{fe})R_L\right]}$$

و وقتی که $Q_۲$ روشن باشد و $Q_۱$ خاموش باشد مدار معادل به صورت زیر می‌باشد ولی روابط هیچ فرقی با روابط بالا نمی‌کند.

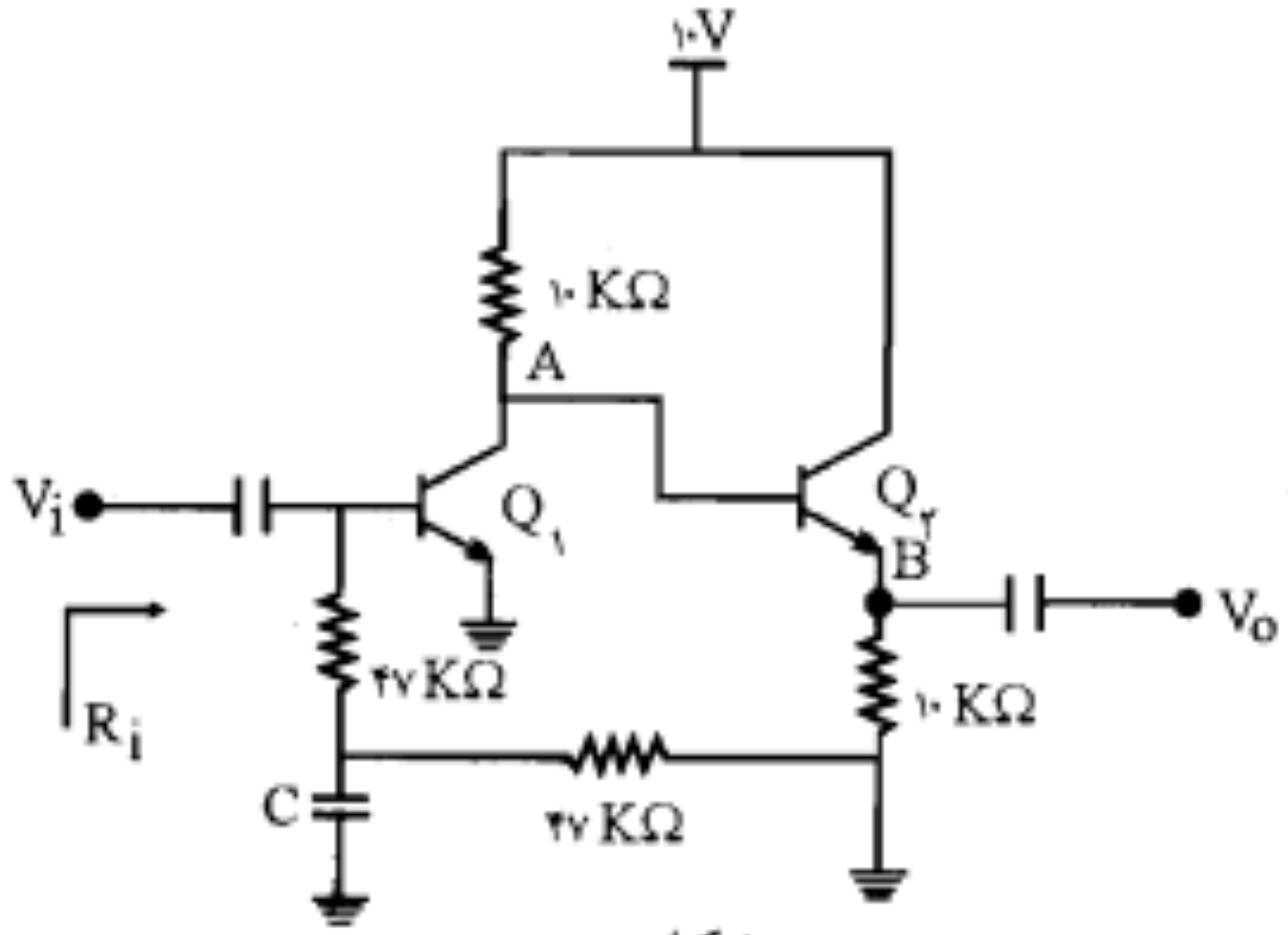
$$\begin{cases} Q_۱ : off \\ Q_۲ : ON \end{cases}$$



۲۹ ـ برای مقادیر بسیار بزرگ β و $V_{BE} = ۰/۷V$، ولتاژ DC نقاط A و B شکل م ـ ۲۹ را به دست آورد. بهره ولتاژ و مقاومت‌های ورودی و خروجی را برای حالت‌های زیر محاسبه کنید؟

الف) مدار را مطابق شکل م ـ ۲۹ در نظر بگیرید.

ب) خازن C را حذف کنید.



شکل م ـ ۲۹

ج) برای بند الف با فرض $V_{CE}(sat) = ۰/۲۷$، بزرگترین دامنه موج سینوسی خروجی بدون برش و اعوجاج چقدر است؟

☑ **راه حل:**

الف) چون طبق صورت مسئله β بسیار بزرگ است پس $I_{B_۱} = ۰$ می‌باشد $\Leftarrow I_{E_۱} = I_{C_۱}$

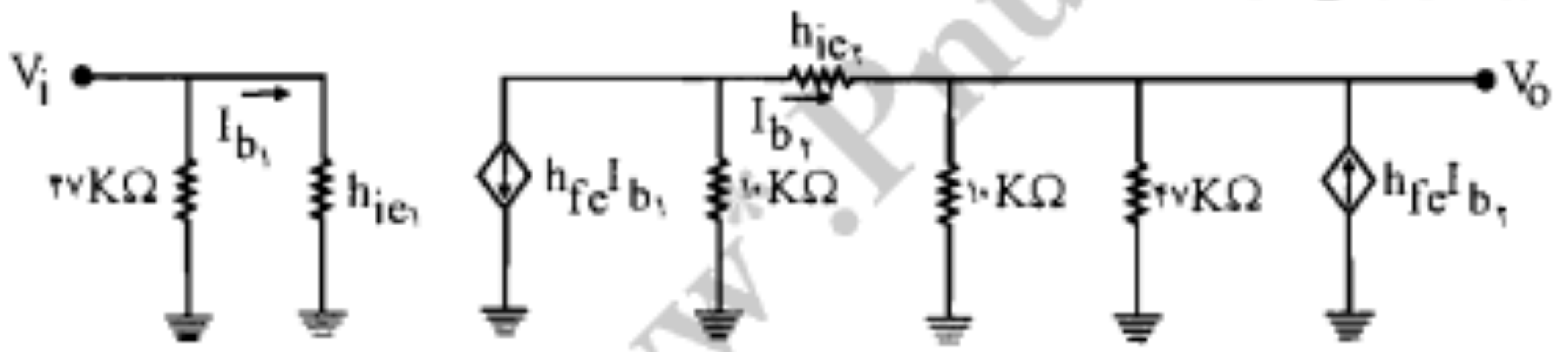
و همچنین $I_{B_۲} = ۰ \Leftarrow I_{C_۲} = I_{E_۲}$ پس ولتاژ نقطه B برابر است با $V_{BE_۱}$.

$$V_B = V_{BE_۱} = ۰/۷V$$

$$V_A = V_B + V_{BE_۲} = ۰/۷ + ۰/۷ = ۱/۴\,V$$

$$\begin{cases} I_{C_۱} = I_{E_۱} = \frac{۱۰ - V_A}{۱۰K\Omega} = \frac{۱۰ - ۱/۴}{۱۰} = ۰/۸۶mA \Rightarrow h_{ie_۱} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_۱}} = \frac{h_{fe} \times ۲۶}{۰/۸۶} = ۰/۰۳h_{fe}K\Omega \\ I_{C_۲} = I_{E_۲} = \frac{V_B}{۱۰K\Omega} = \frac{۰/۷}{۱۰} = ۰/۰۷\,mA \Rightarrow h_{ie_۲} = \frac{h_{fe}V_T}{IC_۲} = \frac{h_{fe} \times ۲۶}{۰/۰۷} = ۰/۳۷\,h_{fe}\,K\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌شود:



$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_i = h_{ie_۱} \cdot I_{b_۱} = ۰/۰۳h_{fe}I_{b_۱} \\ V_O = (۴۷K\Omega \parallel ۱۰K\Omega) \times (۱+h_{fe})I_{b_۲} \cong ۸/۲۴\,h_{fe}I_{b_۲} \end{cases}$$

حلقه: $(۴۷K\Omega \parallel ۱۰K\Omega)$, $h_{ie_۲}$, ۱۰KΩ

$$KVL: ۱۰(h_{fe}I_{b_۱} + I_{b_۲}) + h_{ie_۲}I_{b_۲} + (۴۷K\Omega \parallel ۱۰K\Omega) \times (۱+h_{fe})I_{b_۲} = ۰$$

$$= ۱۰h_{fe}I_{b_۱} + ۱۰I_{b_۲} + ۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲} + ۸/۲۴h_{fe}I_{b_۲} = ۰ \Rightarrow$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ است از $۱۰I_{b_۲}$ در مقابل $۸/۲۴\,h_{fe}I_{b_۲}$ صرفنظر می‌کنیم.

$$I_{b_۱} = \frac{-۸/۶۱I_{b_۲}h_{fe}}{۱۰h_{fe}} = -۰/۸۶۱\,I_{b_۲} \quad (II)$$

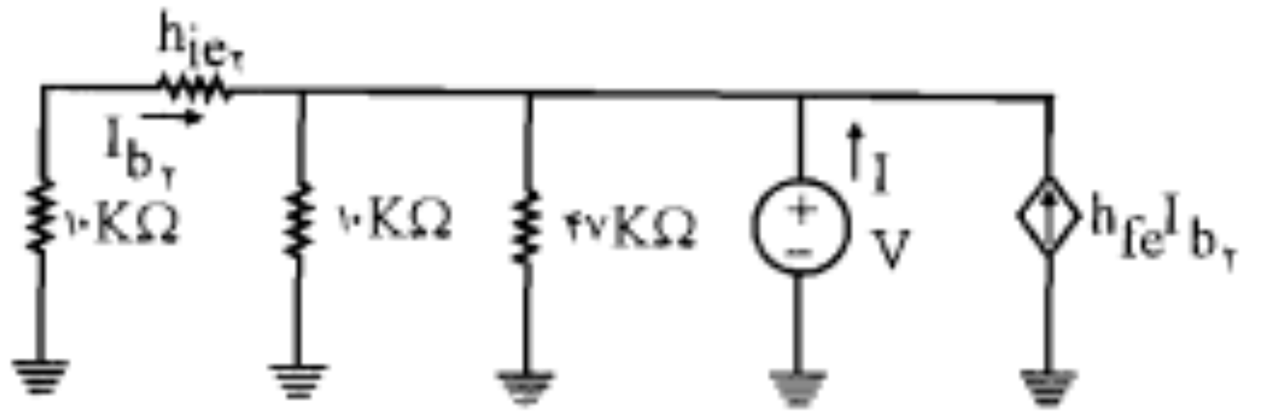
رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{۸/۲۴\,h_{fe}I_{b_۲}}{۰/۰۳h_{fe}I_{b_۱}}$$

$$= \frac{۸/۲۴\, I_{b_۲}}{۰/۰۳ \times (-۰/۸۶۱)\, I_{b_۲}} = -۳۱۹$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = ۴۷K\Omega \parallel h_{ie_۱} = ۴۷K\Omega \parallel ۰/۰۳h_{fe} = ۴۷K\Omega \parallel \infty = ۴۷K\Omega$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت ۱۰ KΩ قرار می‌دهیم و منبع V_i را اتصال می‌کنیم. (چون V_i صفر در نظر گرفته می‌شود پس $Ib_۱$ صفر می‌شود در نتیجه $h_{fe}Ib_۱$ نیز صفر می‌شود.)



$$R_O = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{۴۷} + \frac{V}{۱۰} - I_{b_۲} - h_{fe}I_{b_۲} = \frac{V}{۸/۲۴} - (۱+h_{fe})I_{b_۲} = \frac{V}{۸/۲۴} - h_{fe}I_{b_۲} \quad (III)$$

حلقه: $V, h_{ie_۲}, ۱۰\,K\Omega$

$$KVL: -V = ۱۰\, I_{b_۲} + h_{ie_۲}I_{b_۲} = ۱۰I_{b_۲} + ۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲}$$

از $۱۰\, I_{b_۲}$ در مقابل $۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲}$ صرفنظر می‌کنیم (چون h_{fe} بسیار بزرگ می‌باشد)

$$\Rightarrow -V = ۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲} \Rightarrow I_{b_۲} = \frac{-V}{۰/۳۷h_{fe}} \quad (IV)$$

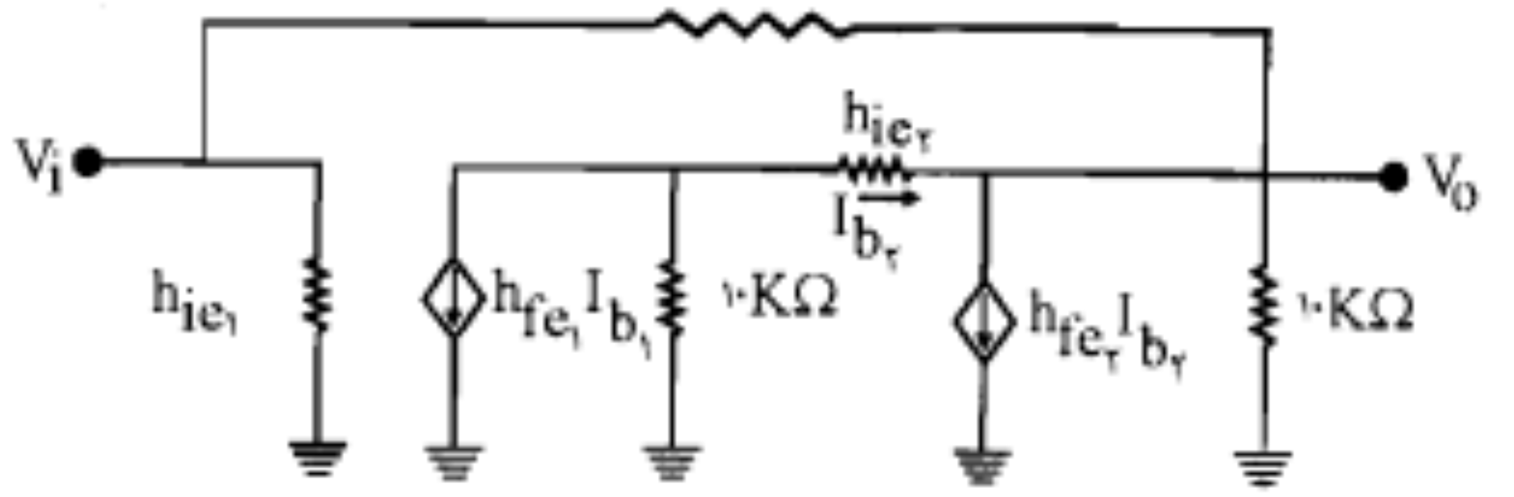
رابطه (IV) را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$I = \frac{V}{۸/۲۴} - h_{fe} \times \frac{-V}{۰/۳۷h_{fe}} = \frac{V}{۸/۲۴} + \frac{V}{۰/۳۷} = V\left(\frac{۱}{۸/۲۴} + \frac{۱}{۰/۳۷}\right) = V \times ۲/۸۲$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۲/۸۲} = ۰/۳۵۵\, K\Omega$$

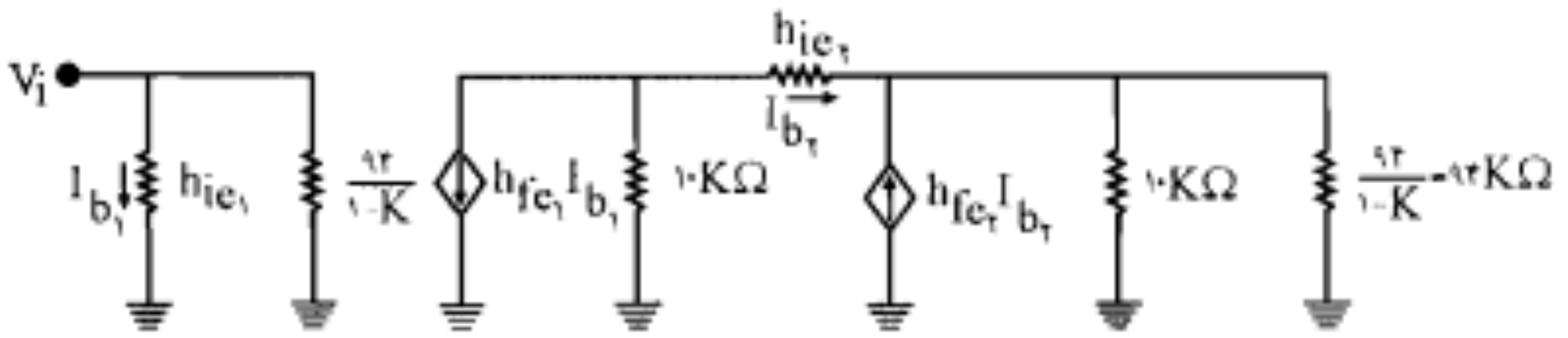
ب) خازن C را حذف می‌کنیم.

$$۴۷K\Omega + ۴۷K\Omega = ۹۴K\Omega$$



شکل(۱)

حال با استفاده از قضیه میلر مدار به صورت زیر درمی‌آید:



$\frac{V_O}{V_i} = \frac{V_۲}{V_۱} = K$ عدد نسبتاً بزرگی می‌باشد پس $\frac{K}{K-۱} \simeq ۱$ می‌باشد پس $۹۴ \simeq \frac{۹۴K}{K-۱}$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_O = (۱+h_{fe})I_{b_۲} \times (۱۰ \parallel ۹۴) = h_{fe}I_{b_۲} \times ۹/۰۴ \\ V_i = h_{ie_۱}I_{b_۱} = ۰/۰۳h_{fe}I_{b_۱} \end{cases}$$

حلقه: $h_{ie_۲}, ۱۰\,K\Omega, (۱۰\,K\Omega \parallel ۹۴\,K\Omega)$

$$KVL: ۱۰h_{fe}I_{b_۱} + ۱۰I_{b_۲} + h_{ie_۲}I_{b_۲} + h_{fe}I_{b_۲} \times ۹/۰۴ = ۰$$

$$\Rightarrow ۱۰h_{fe}I_{b_۱} + ۱۰I_{b_۲} + ۰/۳۷I_{b_۲} \times h_{fe} + ۹/۰۴h_{fe}I_{b_۲} = ۰$$

از $۱۰\, I_{b_۲}$ صرفنظر می‌کنیم.

$$\Rightarrow ۱۰h_{fe}I_{b_۱} = -۰/۳۷I_{b_۲} \times h_{fe} - ۹/۰۴I_{b_۲} \times h_{fe}$$

$$\Rightarrow I_{b_۱} = -\frac{۹/۴۱}{۱۰} I_{b_۲} = -۰/۹۴۱I_{b_۲}$$

با قرار دادن این مقدار در رابطه A_V داریم:

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{h_{fe}I_{b_۲} \times ۹/۰۴}{۰/۰۳h_{fe}I_{b_۱}}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{۹/۰۴\, I_{b_۲}}{۰/۰۳ \times (-۰/۹۴۱)\, I_{b_۲}} = -۳۲۰/۲ = K$$

$$R_i = h_{ie_۱} \parallel \frac{۹۴}{۱-K} = ۰/۰۳h_{fe} \parallel \frac{۹۴}{۱+۳۲۰/۲} = \frac{۹۴}{۳۲۱/۲} = ۰/۲۹۳\, K\Omega$$

حال برای محاسبه R_O باید در شکل (۱) یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار داد و منبع ورودی را صفر در نظر گرفت با صفر شدن منبع ورودی $I_{b_۱}$ صفر می‌شود پس $h_{fe}I_{b_۱}$ نیز صفر می‌شود.

$$R_O = \frac{V}{I}$$

www.PnuEB.com

$$I=\frac{V}{۱۰}+\frac{V}{۹۴}-(۱+h_{fe})I_{b_۲}\simeq\frac{V}{۱۰}+\frac{V}{۹۴}-h_{fe}I_{b_۲}$$

در حلقه V و $h_{ie_۲}$ و ۱۰K داریم:

$$KVL: -V=(۱۰+h_{ie_۲})Ib_۲$$

$$\Rightarrow -V=۱۰I_{b_۲}+h_{ie_۲}I_{b_۲}=۱۰I_{b_۲}+۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲}\simeq ۰/۳۷h_{fe}I_{b_۲}$$

$$\Rightarrow I_{b_۲}=\frac{-V}{۰/۳۷\,h_{fe}}$$

با قرار دادن این مقدار $I_{b_۲}$ در رابطه جریان داریم:

$$I=\frac{V}{۱۰}+\frac{V}{۹۴}-h_{fe}I_{b_۲}$$

$$=\frac{V}{۱۰}+\frac{V}{۹۴}-h_{fe}\times\frac{-V}{۰/۳۷h_{fe}}=V\left(\frac{۱}{۱۰}+\frac{۱}{۹۴}+\frac{۱}{۰/۳۷}\right)$$

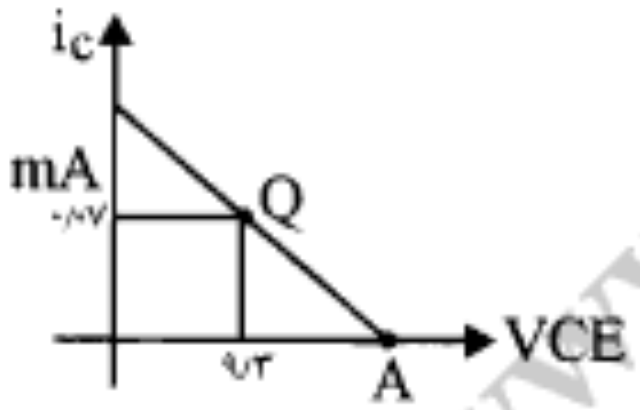
$$\Rightarrow I=V\times ۲/۸۱\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=۰/۳۵۵۵\ K\Omega$$

ج)

$$I_{C_۲Q}=۰/۰۷mA$$

$$V_{CE_۲Q}=V_{C_۲}-V_{E_۲}=۱۰-V_B=۱۰-۰/۷=۹/۳V$$

با وجود خازن C ، R_L برابر است با:



$$۱۰K\Omega \,\|\, ۴۷K\Omega=۸/۲۴\,k\Omega$$

معادله خط بار ac: $V_{ce}=-R_{ac}\,i_c$

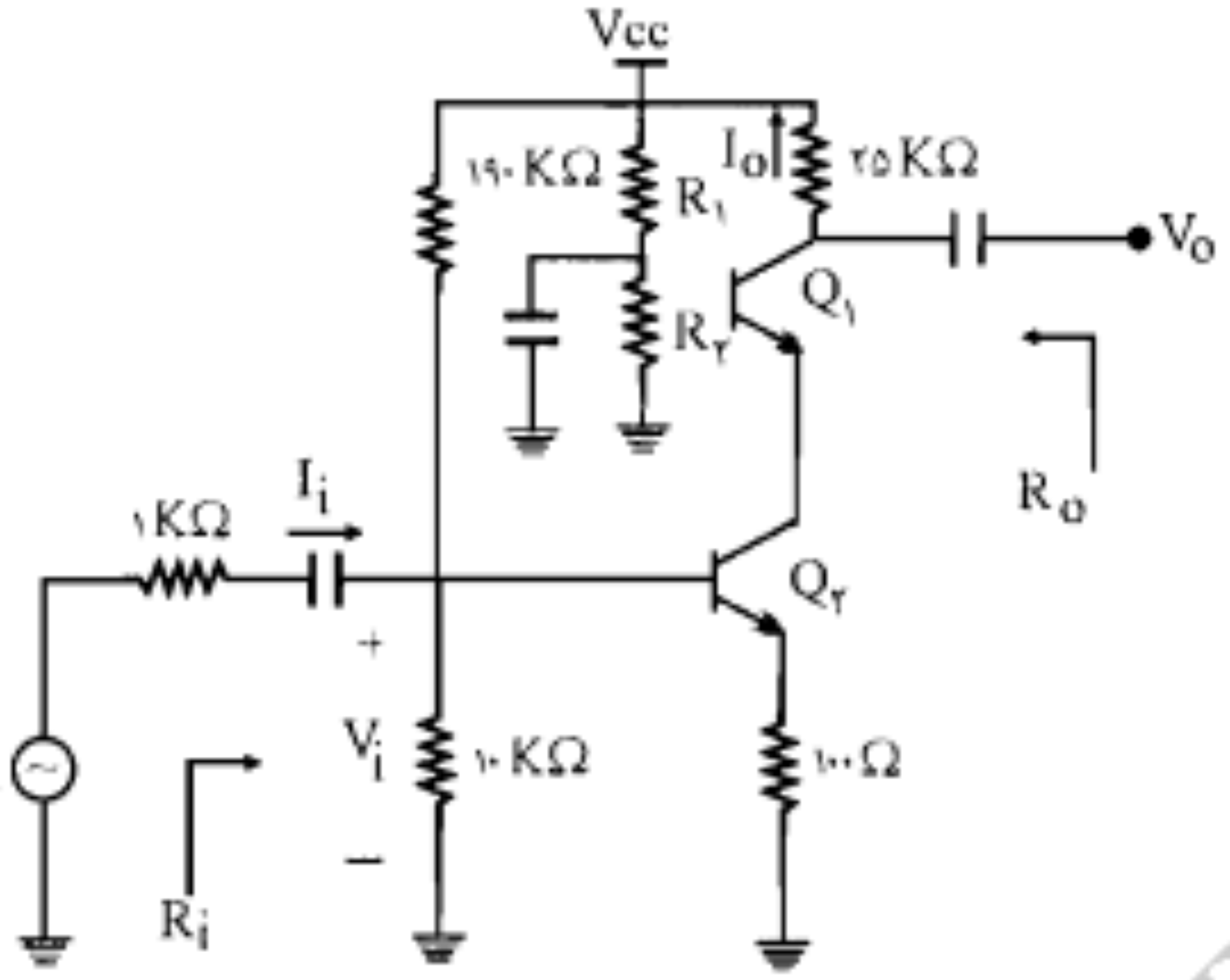
$$\Rightarrow V_{ce}=-۸/۲۴\,i_c\Rightarrow V_{CE}-V_{CEQ}=-۸/۲۴(i_C-I_{CQ})$$

(i_c صفر می‌شود) $V_{CE}(A)=V_{CEQ}+۸/۲۴I_{CQ}=۹/۳+۸/۲۴\times ۰/۰۷=۹/۸۸$

$$\Rightarrow\begin{cases}V_\circ(max)=V_{CEQ}-V_{CE}(sat)=۹/۳-۰/۲=۹/۱ & \text{حداکثر دامنه انحراف بدون برش از طرف اشباع}\\ V_O(max)=V_{CE}(A)-V_{CE}(Q)=۹/۸۸-۹/۳=۹/۵۸ & \text{حداکثر دامنه انحراف بدون برش از طرف قطع}\end{cases}$$

پس حداکثر انحراف بدون برش $V_O(max)=۰/۵۸$ خواهد بود. (یعنی کمترین مقدار به دست آمده)

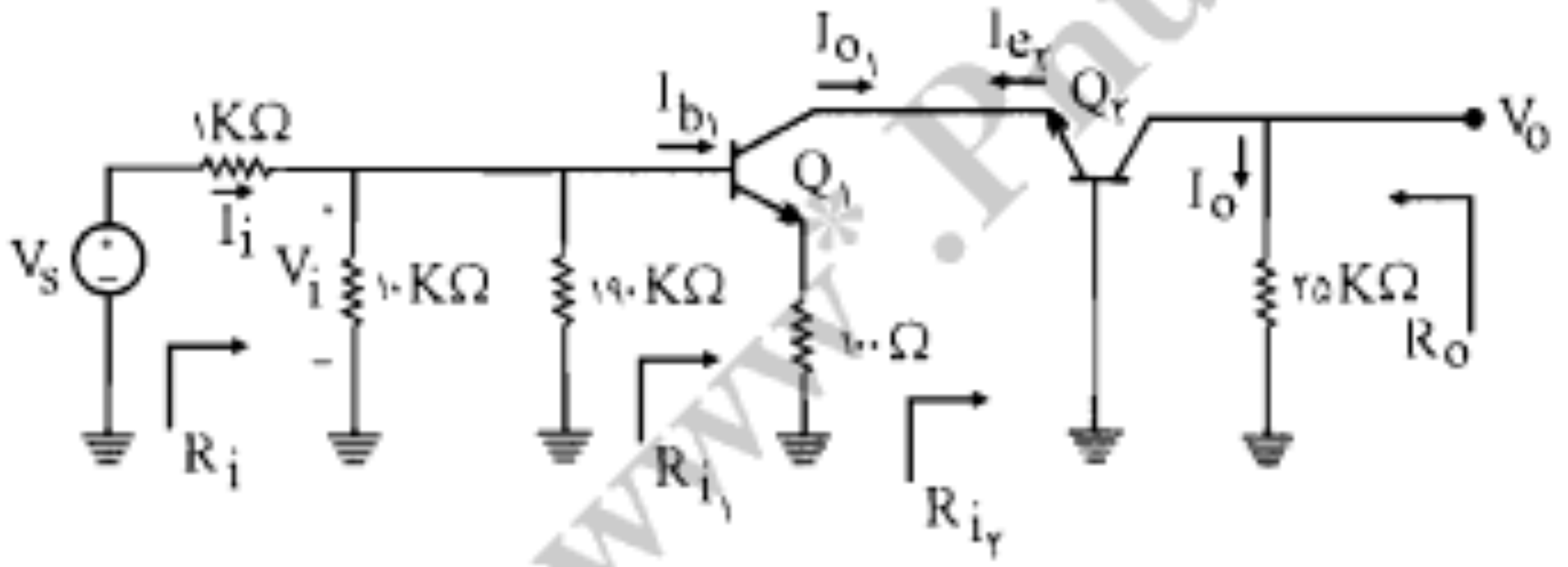
۳۰ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۳۰ ترانزیستورها مشابه و برای آنها $h_{ie}=۱K\Omega$ و $h_{fe}=۵۰$ است. کمیت‌های A_I ، A_V ، A_{V_s} ، R_i و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۳۰

☑ راه حل:

مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{I_O}{I_{e_۲}}\times\frac{I_{e_۲}}{I_{b_۱}}\times\frac{I_{b_۱}}{I_i}\qquad (I)$$

$$\begin{cases}\dfrac{I_O}{I_{e_۲}}=\dfrac{h_{fe}}{۱+h_{fe}}=\dfrac{۵۰}{۵۱}\\[2mm] \dfrac{I_{e_۲}}{I_{b_۱}}=-h_{fe}=-۵۰\\[2mm] \dfrac{I_{b_۱}}{I_i}=\dfrac{I_i\times\frac{۱}{R_{i_۱}}}{I_i\times\left(\frac{۱}{۱۰}+\frac{۱}{۱۹۰}+\frac{۱}{R_{i_۱}}\right)}\end{cases}$$

و $R_{i_۱}=h_{ie_۱}+(۱+h_{fe})\times ۰/۱=۱K\Omega+۵۱\times ۰/۱=۶/۱K\Omega$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow \frac{I_{b_۱}}{I_i}=\frac{\frac{۱}{۶/۱}}{\frac{۱}{۱۰}+\frac{۱}{۱۹۰}+\frac{۱}{۶/۱}}=\frac{۰/۱۶۴}{۰/۲۶۹}=۰/۶۱ \qquad (I):\ A_I=\frac{۵۰}{۵۱}\times(-۵۰)\times ۰/۶۱=-۲۹/۹$$

$$R_i=R_{i_۱}\parallel(۱۰K\Omega \parallel ۱۹۰K\Omega)=۶/۱K\Omega \parallel ۹/۵K\Omega=۳/۷\,K\Omega$$

$$R_{i_۲}=\frac{V_{e_۲}}{I_{e_۲}}=\frac{h_{ie}}{۱+h_{fe}}=\frac{۱}{۵۱}K\Omega$$

$$R_O=R_L=۲۵K\Omega$$

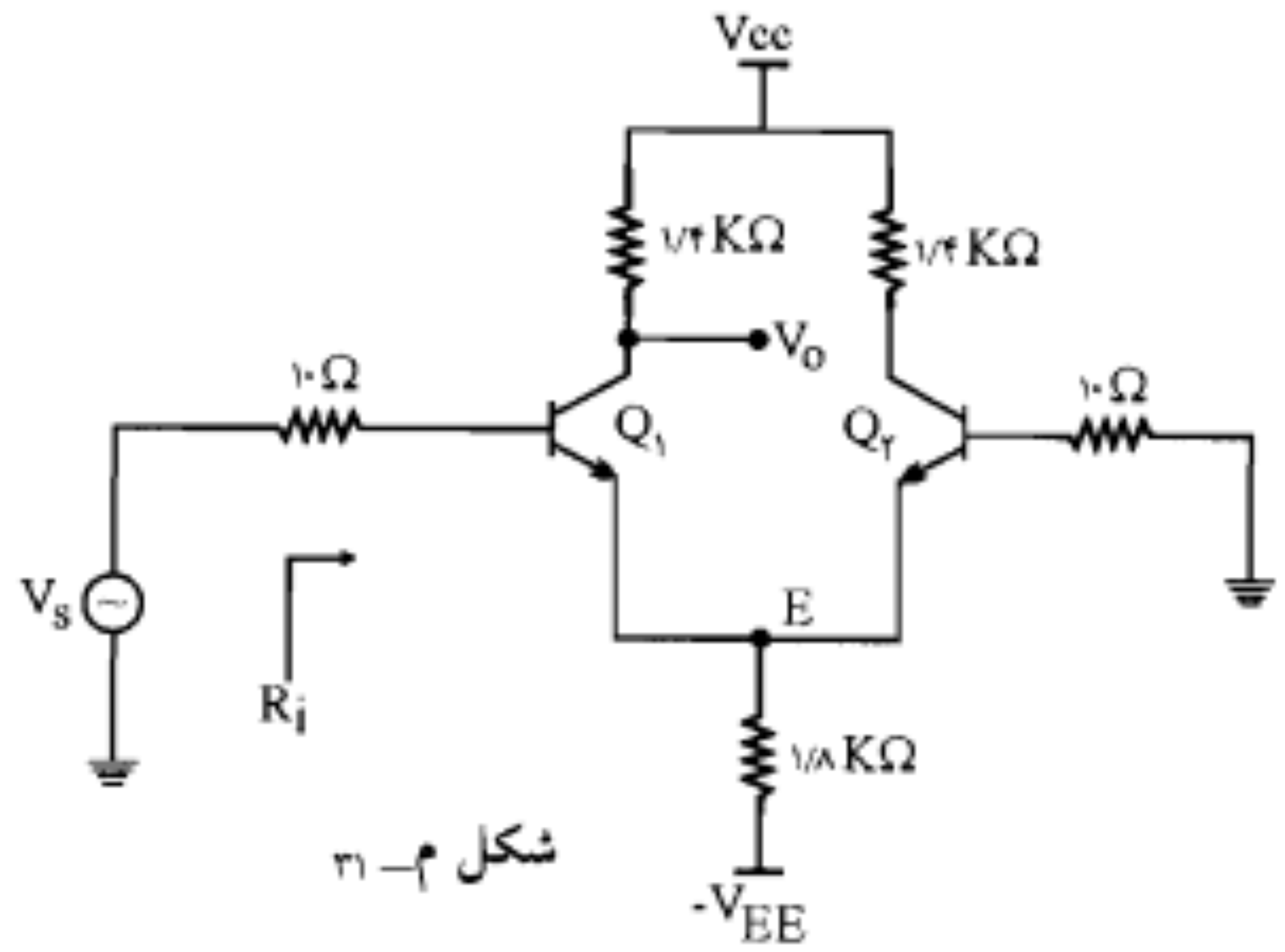
$$A_V=\frac{V_O}{V_i}=\frac{V_O}{V_{e_۲}}\times\frac{V_{e_۲}}{V_{b_۱}} \qquad (II)$$

$$(V_i=V_{b_۱})\Rightarrow\begin{cases}\frac{V_O}{V_{e_۲}}=A_{I_۲}\times\frac{R_{L_۲}}{R_{i_۲}}=\frac{۵۰}{۵۱}\times\frac{۲۵}{\frac{۱}{۵۱}}=۱۲۵۰\\ \frac{V_{e_۲}}{V_{b_۱}}=A_{I_۱}\times\frac{R_{L_۱}}{R_{i_۱}}=\frac{I_{e_۲}}{I_{b_۱}}\times\frac{R_{L_۱}}{R_{i_۱}}\ (R_{L_۱}=R_{i_۲})\\ =-۵۰\times\frac{\frac{۱}{۵۱}}{۶/۱}=-۰/۱۶\end{cases}$$

$$(II): A_V=۱۲۵۰\times(-۰/۱۶)=-۲۰۰$$

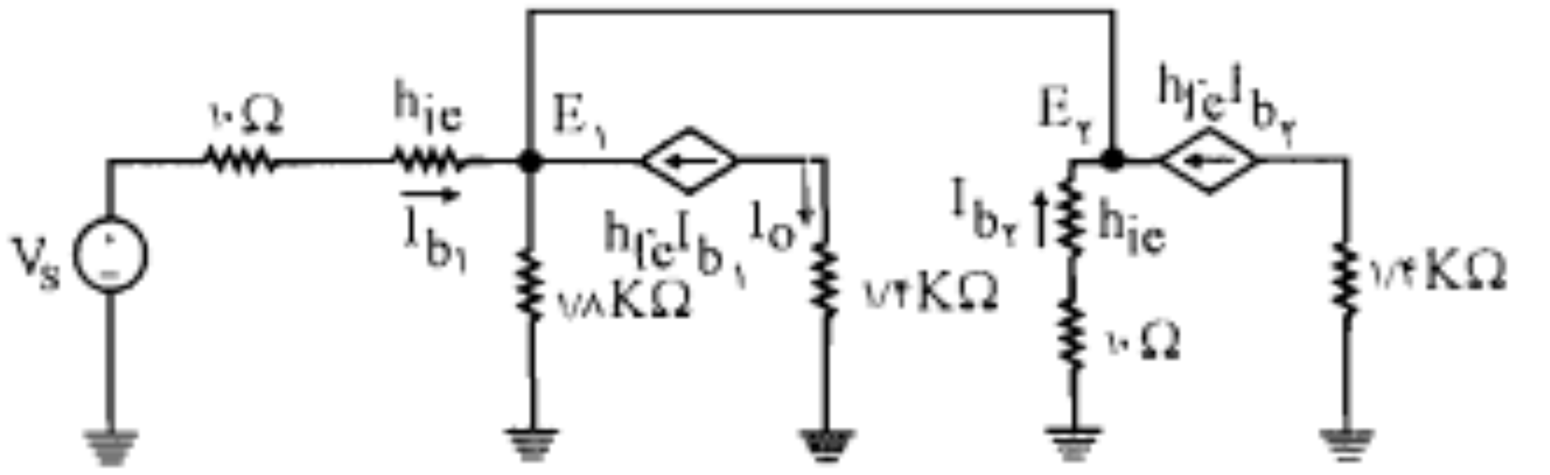
$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=-۲۰۰\times\frac{۳/۷}{۳/۷+۱}=-۲۰۰\times\frac{۳/۷}{۴/۷}=-۱۵۷/۴۷$$

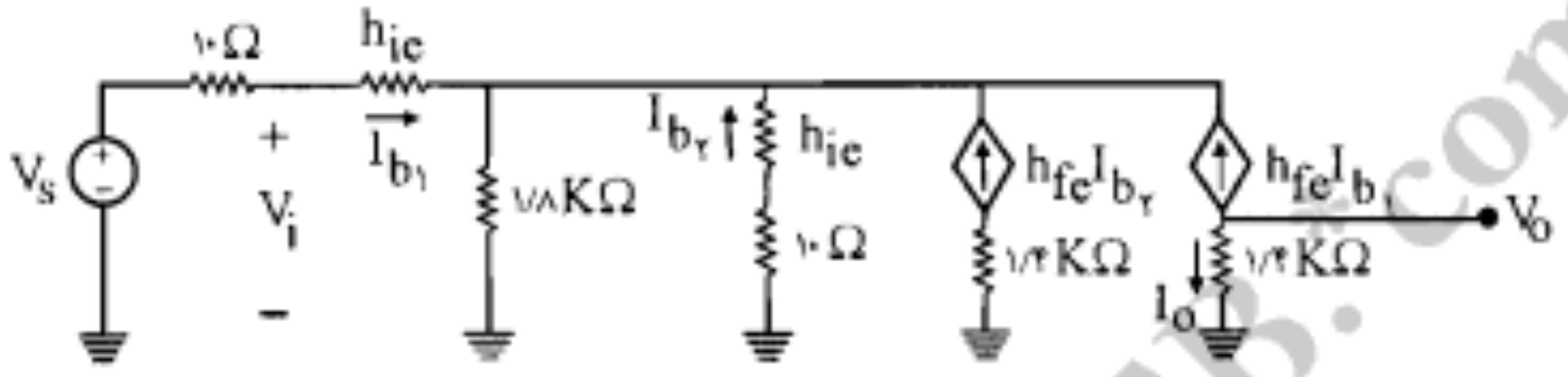
۳۱ ـ شکل م ـ ۳۱ یک تقویت‌کننده تفاضلی است. در این تقویت کننده $Q_۱$ و $Q_۲$ کاملاً مشابه‌اند و $h_{ie}=۷۰۰\,\Omega$ و $h_{fe}=۲۰۰$ است. مطلوب است محاسبه R_i و A_{V_s}.



شکل م ـ ۳۱

☑ **راه حل:** مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:





حلقه: h_{ie} و $۱۰\,\Omega$ و $۱/۸K\Omega$

$$KVL:\ ۱/۸(I_{b_۱}+I_{b_۲}+h_{fe}I_{b_۱}+h_{fe}I_{b_۲})+\left(\frac{۱۰^{\Omega}+۷۰۰^{\Omega}}{۱۰^۳}\right)I_{b_۲}=۰$$

$$\Rightarrow ۱/۸(I_{b_۱}+۲۰۰I_{b_۱})+۱/۸(I_{b_۲}+۲۰۰I_{b_۲})+۰/۷۱I_{b_۲}=۰$$

$$\Rightarrow ۲۰۱\times ۱/۸I_{b_۱}=-۳۶۱/۸I_{b_۲}-۰/۷۱I_{b_۲}=-۳۶۲/۵۱\,I_{b_۲}$$

$$\Rightarrow I_{b_۱}=-۱/۰۰۲I_{b_۲}$$

$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{-h_{fe}I_{b_۱}}{I_{b_۱}}=-h_{fe}=-۲۰۰$$

$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{h_{ie}I_{b_۱}-۰/۷۱I_{b_۲}}{I_{b_۱}}=\frac{۰/۷\times(-۱/۰۰۲I_{b_۲})-۰/۷۱I_{b_۲}}{-۱/۰۰۲I_{b_۲}}$$

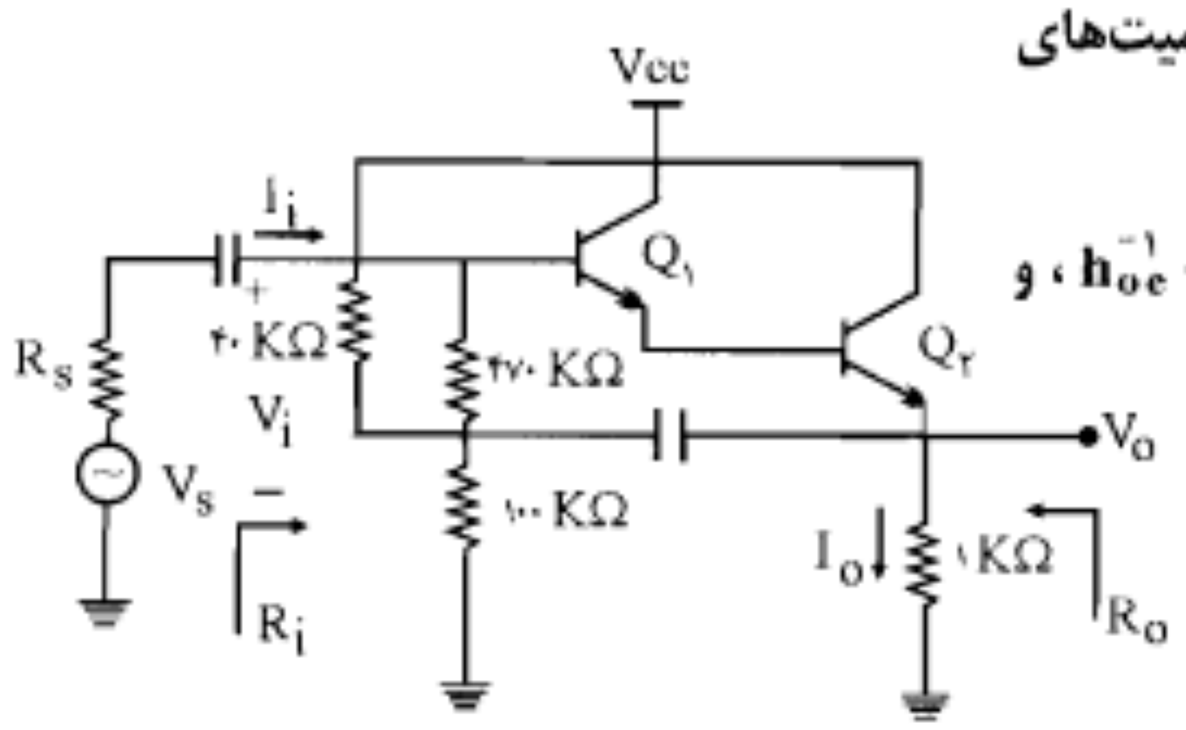
$$\Rightarrow R_i=\frac{-۰/۷۰۱۴I_{b_۲}-۰/۷۱I_{b_۲}}{-۱/۰۰۲I_{b_۲}}=۱/۴۱K\Omega$$

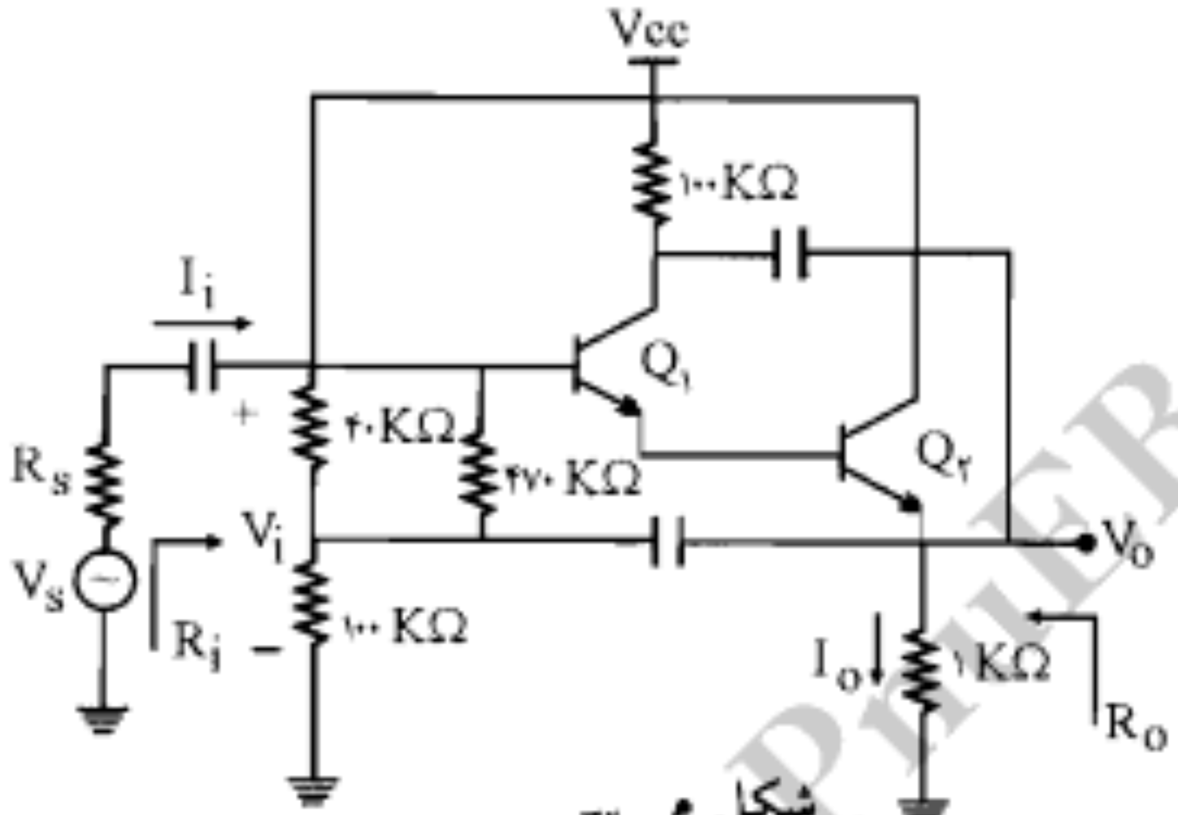
$$A_V=A_I\times\frac{R_L}{R_i}=-۲۰۰\times\frac{۱/۴}{۱/۴۱}=-۱۹۸/۵۸$$

$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=-۱۹۸/۵۸\times\frac{۱/۴۱}{۱/۴۱+۰/۰۱}=-۱۹۷/۱۸$$

www.PnuEB.com
www.PnuEB.com

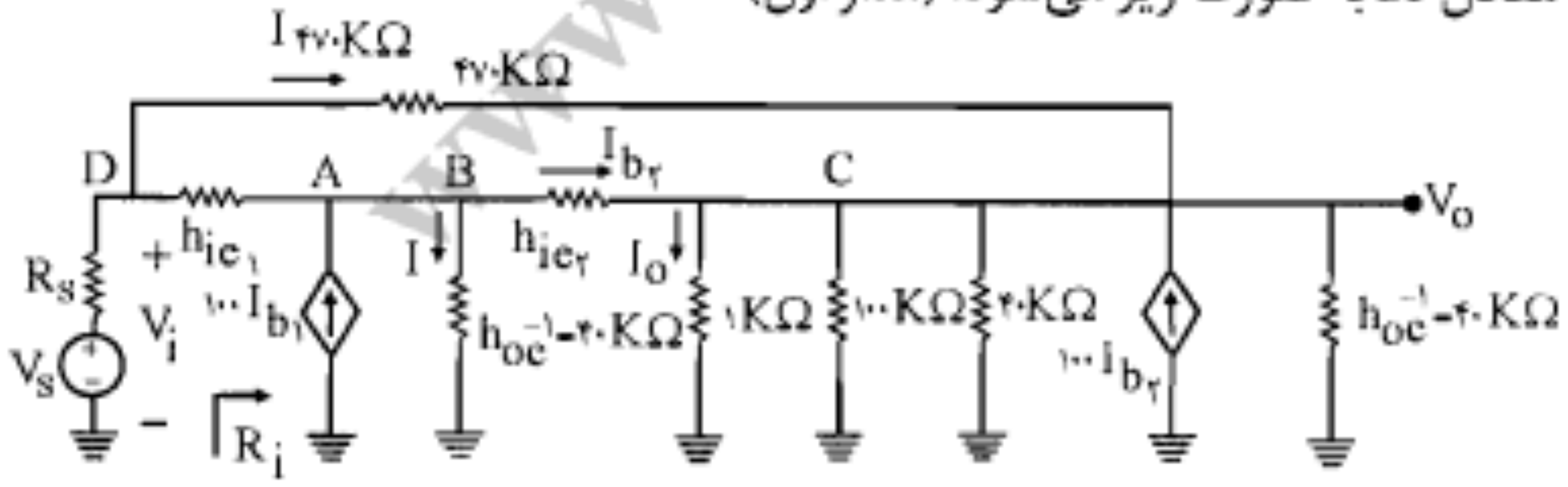
۳۲ـ در تقویت‌کننده‌های شکل م ـ ۳۲ کمیت‌های A_I، A_V، R_i و R_O را محاسبه نمائید. ترانزیستورها مشابه، $h_{oe}^{-1} = 40\,K\Omega$، و $h_{ie_2} = 1\,K\Omega$ و $h_{fe} = 100$ است.





شکل م ـ ۳۲

☑ **راه حل:** مدار معادل ac به صورت زیر می‌شود: (مدار اول)



با استفاده از تقسیم جریان

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} \qquad (A)$$

$$I_O = (I_{b_2} + 100 I_{b_2} + I_{470K\Omega}) \times \frac{\frac{1}{1K\Omega}}{\frac{1}{1K\Omega} + \frac{1}{40K\Omega} + \frac{1}{40K\Omega} + \frac{1}{1K\beta}}$$

$$= \frac{50}{53}(101 I_{b_2} + I_{470K\Omega}) \quad (I)$$

(گره A) $KCL: I_{b_2} = I_{b_1} + 100 I_{b_1} - I_{40K\Omega} = 101 I_{b_1} - \frac{h_{ie_2} I_{b_2} + I_O}{40K\Omega}$

$$\Rightarrow 41 I_{b_2} = 4040 I_{b_1} - I_O \quad (II)$$

حلقه: $470K\Omega$, h_{ie_1} , h_{ie_2}

$$KVL: 470 I_{470K\Omega} - 1\times I_{b_1} - 1\times I_{b_2} = 0$$

$$\Rightarrow I_{470K\Omega} = \frac{I_{b_1} + I_{b_2}}{470} = 2/13 \times 10^{-3}(I_{b_1} + I_{b_2}) \quad (III)$$

رابطه (III) را در رابطه (I) جایگزین می‌کنیم:

$$\Rightarrow I_O = \frac{50}{53}(101 I_{b_2} + 2/13 \times 10^{-3}(I_{b_1} + I_{b_2}))$$

با جایگذاری این رابطه به دست آمده در رابطه (II) داریم:

$$41 I_{b_2} = 4040 I_{b_1} - \frac{50}{53}(101 I_{b_2} + 2/13 \times 10^{-3}(I_{b_1} + I_{b_2}))$$

$$\Rightarrow 41 I_{b_2} = 4040 I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 101 I_{b_2} - \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_2}$$

از $I_{b_2}\,10^{-3} \times 2/13 \times \frac{50}{53}$ در مقابل $\frac{50}{53} \times 101 I_{b_2}$ صرفنظر می‌کنیم و $\frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_1}$ در مقابل $4040 I_{b_1}$ نیز قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

$$\Rightarrow 41 I_{b_2} = 4040 I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 101 I_{b_2} \Rightarrow 136/3 I_{b_2} = 4040 I_{b_1}$$

$$\Rightarrow I_{b_2} = 29/6\, I_{b_1}$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه (III) داریم:

$$I_{470K\Omega} = 2/13 \times 10^{-3}(I_{b_1} + 29/6 I_{b_1}) = 2/13 \times 10^{-3} \times 30/6 I_{b_1}$$

$$= 65 \times 10^{-3} I_{b_1}$$

$$\overset{(I)}{\Rightarrow} I_O = \frac{50}{53}(101 \times 29/6 I_{b_1} + 65 \times 10^{-3} I_{b_1}) = 2820 I_{b_1}$$

$$\overset{(A)}{\Rightarrow} A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{2820 I_{b_1}}{I_{470K\Omega} + I_{b_1}} = \frac{2820 I_{b_1}}{65 \times 10^{-3} I_{b_1} + I_{b_1}} = 2648$$

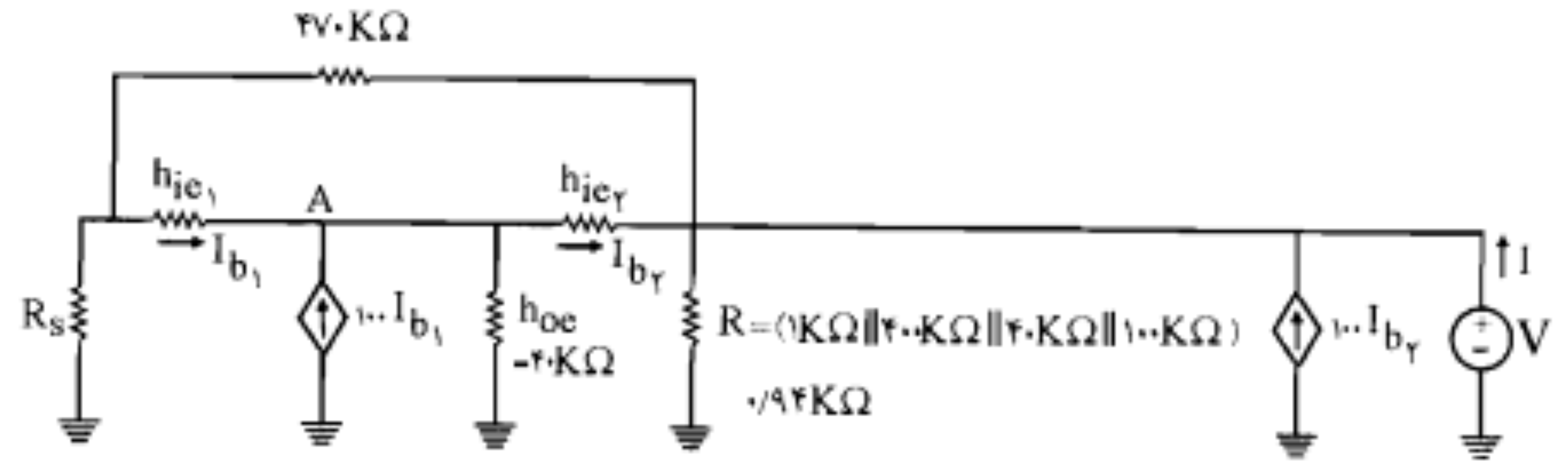
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{470 \times I_{470K} + I_O \times 1}{I_i} = 470 \frac{I_{470}}{I_i} + A_I$$

$$\Rightarrow R_i = 470 \times \frac{0/065 I_{b_1}}{1/065 I_{b_1}} + 2648 = 2676/7\, K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = 2648 \times \frac{1}{2676/7} = 0/989$$

www.PnuEB.com

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم.



$$R_{۰}=\frac{V}{I}$$

$$I=\frac{V}{۰/۹۴}-I_{b_۲}-۱۰۰I_{b_۲}-I_{۴۷۰KΩ}\quad (I)$$

(گره A) KCL: $I_{b_۲}=۱۰۰I_{b_۱}+I_{b_۱}-I_{۴۰KΩ}$

$$\Rightarrow I_{b_۲}=۱۰۱I_{b_۱}-\frac{۱\times I_{b_۲}+V}{۴۰KΩ}\quad (II)$$

حلقه: V , ۴۷۰ KΩ , R_s

KVL: $۴۷۰I_{۴۷۰KΩ}+R_sI_{R_s}+V=۰$

$$\Rightarrow ۴۷۰I_{۴۷۰KΩ}-R_s(I_{b_۱}+I_{۴۰KΩ})=-V\Rightarrow -V=I_{۴۷۰KΩ}(۴۷۰+R_s)+R_sI_{b_۱}\quad (III)$$

حلقه: ۴۷۰ KΩ , ۱KΩ , ۱KΩ

KVL: $۴۷۰I_{۴۷۰KΩ}-۱\times I_{b_۱}-۱\times I_{b_۲}=۰\Rightarrow I_{۴۷۰KΩ}=\frac{I_{b_۱}+I_{b_۲}}{۴۷۰KΩ}$

این رابطه را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$-V=(\frac{I_{b_۱}+I_{b_۲}}{۴۷۰KΩ})(۴۷۰+R_s)+R_sI_{b_۱}$$

$$\Rightarrow I_{b_۱}+I_{b_۲}+\frac{R_s}{۴۷۰}(I_{b_۱}+I_{b_۲})+R_sI_{b_۱}=-V$$

از $\frac{R_sI_{b_۱}}{۴۷۰}$ در مقابل $R_sI_{b_۱}$ صرفنظر می‌کنیم.

$$(۱+R_s)I_{b_۱}+(۱+\frac{R_s}{۴۷۰})I_{b_۲}=-V$$

طبق رابطه (II) داریم:

$$۱۰۱I_{b_۱}-۱/۰۲۵I_{b_۲}=۰/۰۲۵V$$

با استفاده از دو معادله بالا $I_{b_۱}$ و $I_{b_۲}$ را به دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} I_{b_۱}=-\frac{(۱-۵\times۱۰^{-۵}R_s)V}{۱۰۲+۱/۲۴R_s} \\ I_{b_۲}=-\frac{(۱۰۱+۲۵\times۱۰^{-۳}R_s)}{۱۰۲+۱/۲۴R_s}V \end{cases}$$

با جایگذاری این دو مقدار در رابطه (III) داریم:

$$I_{۴۷۰KΩ}=-\frac{۱}{۴۷۰}(\frac{۱۰۲+۲۵\times۱۰^{-۳}}{۱۰۲+۱/۲۴R_s})V$$

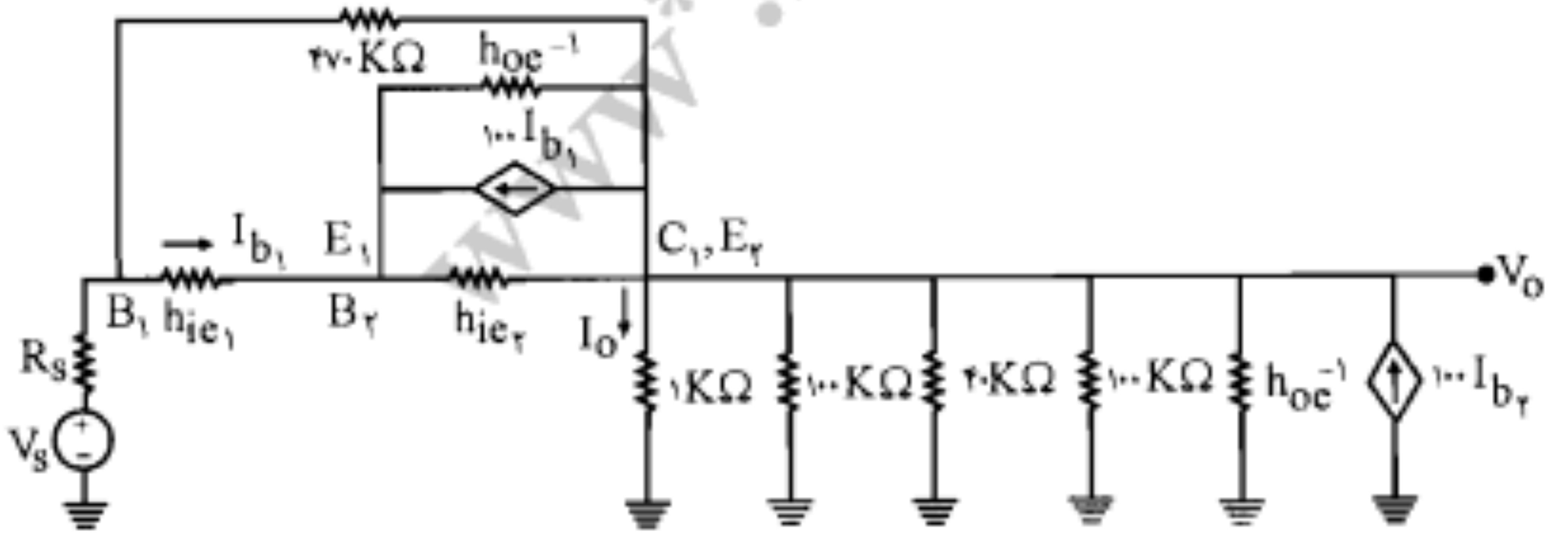
با جایگذاری مقادیر $I_{۴۷۰KΩ}$ و $I_{b_۲}$ در رابطه (I) داریم:

$$I=\frac{V}{۰/۹۴}+۱۰۱\times\frac{(۱۰۱+۲۵\times۱۰^{-۳}R_s)}{۱۰۲+۱/۲۴R_s}V+\frac{۱}{۴۷۰}\times\frac{(۱۰۲+۲۵\times۱۰^{-۳}R_s)}{۱۰۲+۱/۲۴R_s}V$$

$$\Rightarrow I=(\frac{۱۰۲+۱/۲۴R_s+۹۵۸۹+۲/۴R_s}{۰/۹۴(۱۰۲+۱/۲۴R_s)})V$$

$$\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=\frac{۹۵/۹+۱/۱R_s}{۹۶۹۱+۳/۶۴R_s}$$

مدار دوم، مدار معادل ac این مدار را رسم می‌کنیم:



$E_۱$ گره: KCL: $I_{b_۱}+۱۰۰I_{b_۱}=I_{b_۲}+\frac{۱\times I_{b_۲}}{۴۰}\Rightarrow I_{b_۲}=۹۸/۵I_{b_۱}$

۴۷۰kΩ , $h_{ie_۱}$, $h_{ie_۲}$ حلقه

KVL: $۴۷۰I_{۴۷۰KΩ}=۱\times I_{b_۱}+۱\times I_{b_۲}\Rightarrow ۴۷۰I_{۴۷۰KΩ}=I_{b_۱}+۹۸/۵I_{b_۱}$

$$\Rightarrow I_{۴۷۰KΩ}=۰/۲۱I_{b_۱}$$

(گره $C_۱$) $I_O=(I_{b_۲}+۱۰۰I_{b_۲}-۱۰۰I_{b_۱}+\frac{۱\times I_{b_۲}}{۴۰}\ I_{۴۷۰KΩ})\times\frac{۱}{\frac{۱}{۱}+\frac{۱}{۱۰۰}+\frac{۱}{۴۰}+\frac{۱}{۴۰}+\frac{۱}{۱۰۰}}$

$$\Rightarrow I_O=(۱۰۱/۰۲۵I_{b_۲}-۱۰۰I_{b_۱}+۰/۲۱I_{b_۱})\times\frac{۲۰۰}{۲۱۴}$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow I_O = (۱۰۱/۰۲۵ \times ۹۸/۵ I_{b_۱} - ۹۹/۷۹ I_{b_۱}) \times \frac{۱۰۰}{۱۰۷} = ۹۲۰۷ I_{b_۱}$$

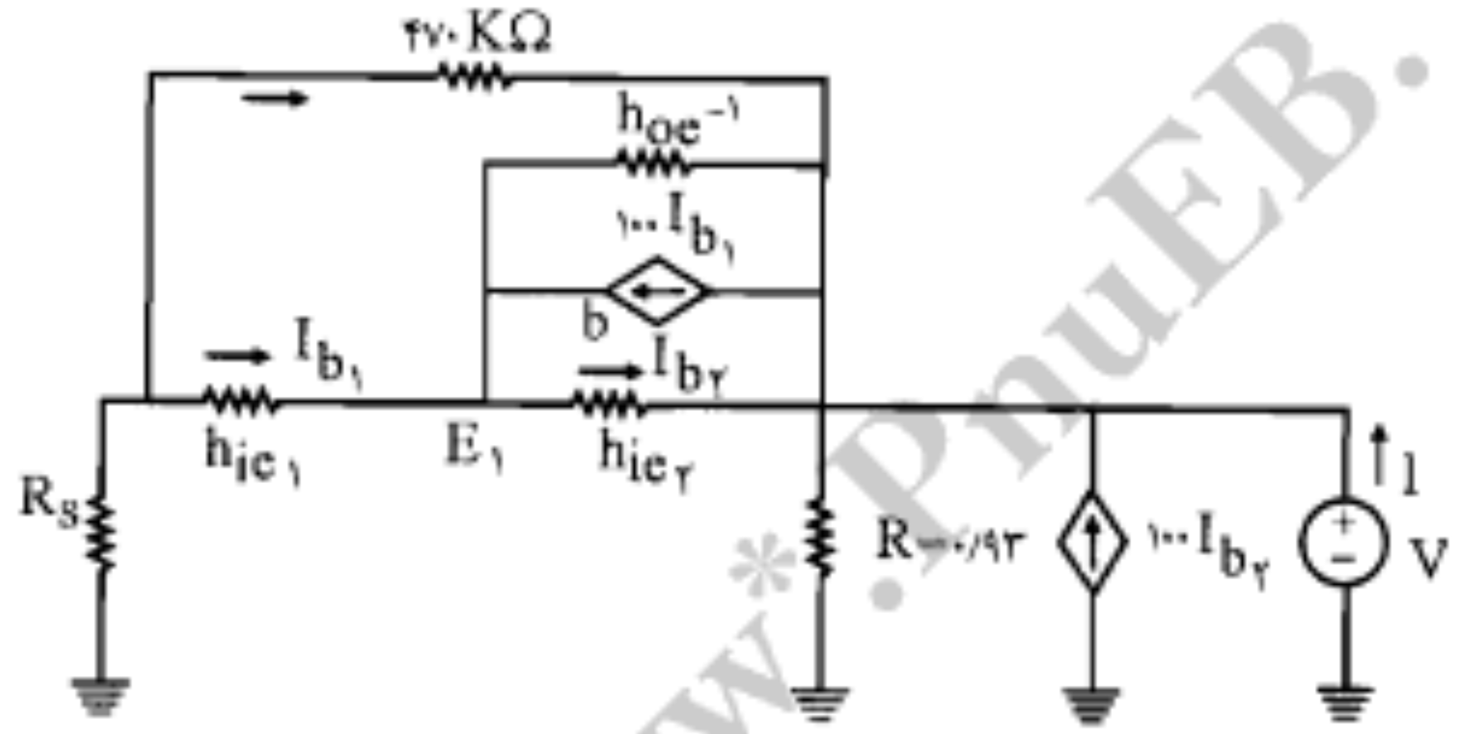
$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{۹۲۰۷ I_{b_۱}}{I_{b_۱} + I_{۴۷۰K\Omega}} = \frac{۹۲۰۷ I_{b_۱}}{I_{b_۱} + ۰/۲۱ I_{b_۱}} = ۷۶۰۹$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۴۷۰ I_{۴۷۰K\Omega} + ۱ \times I_O}{I_i} = ۴۷۰ \frac{I_{۴۷۰K\Omega}}{I_i} + A_I = ۴۷۰ \times \frac{۰/۲۱ I_{b_۱}}{۱/۲۱ I_{b_۱}} + ۷۶۰۹$$

$$\Rightarrow R_i = ۷۶۹۱ \, K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۷۶۰۹ \times \frac{۱}{۷۶۹۱} = ۰/۹۸۹$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم



(گره $E_۱$) KCL: $I_{b_۲} = ۹۸/۵ I_{b_۱}$

حلقه V , $۴۷۰K\Omega$, R_s

$$KVL: R_s (I_{b_۱} + I_{۴۷۰K\Omega}) + ۴۷۰ I_{۴۷۰K\Omega} = -V$$

$$\Rightarrow (۱/۲۱ R_s + ۹۹/۵) I_{b_۱} = -V \Rightarrow I_{b_۱} = \frac{-V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s}$$

$$I_{۴۷۰K\Omega} = ۰/۲۱ I_{b_۱} = \frac{۰/۲۱ V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s}$$

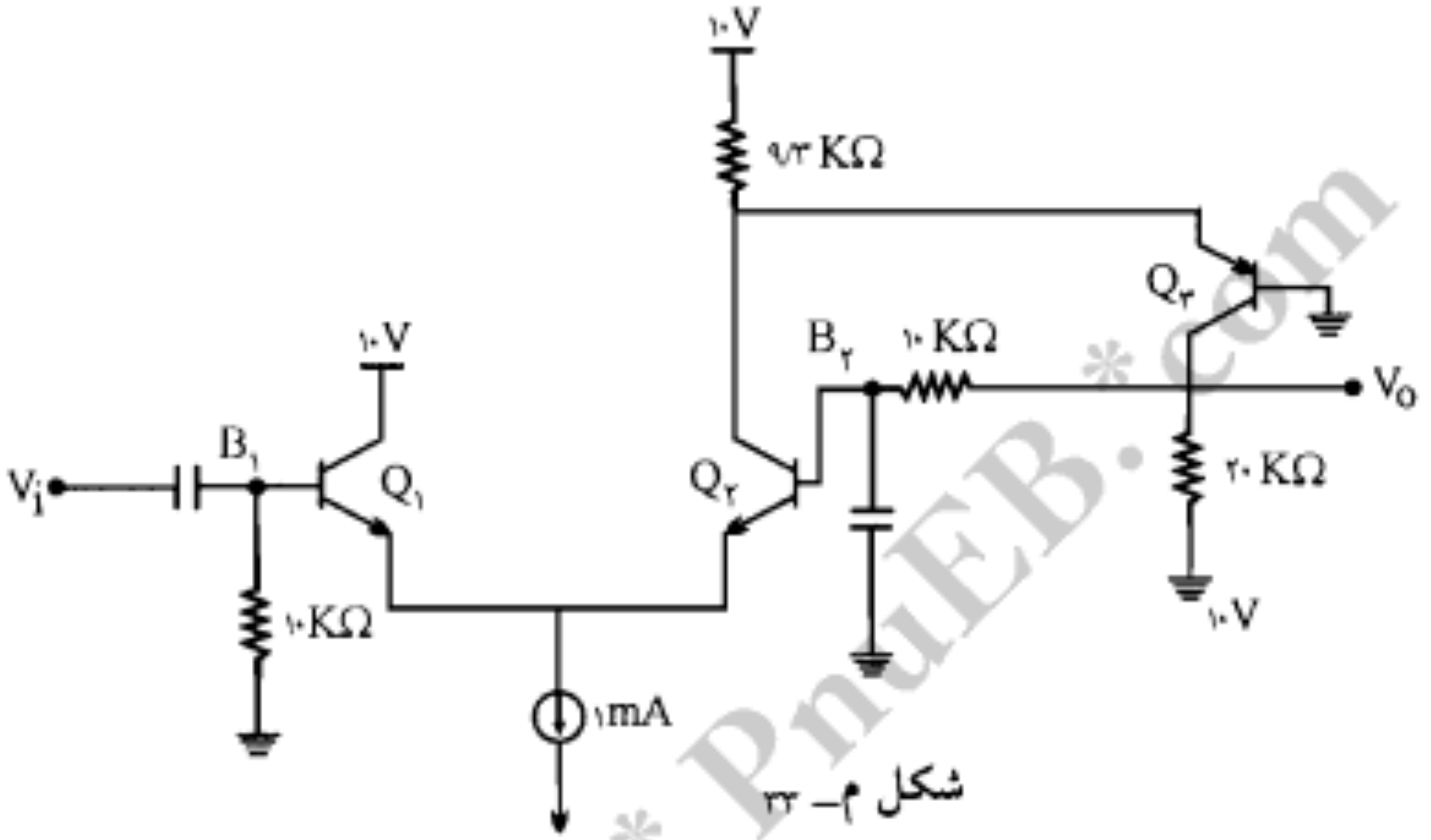
$$I_{b_۲} = ۹۸/۵ I_{b_۱} = -\frac{۹۸/۵ V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{۰/۹۳} + ۱۰۰ I_{b_۱} - \frac{۱ \times I_{b_۲}}{۴۰} - ۱۰۱ I_{b_۲} - I_{۴۷۰K\Omega}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{۰/۹۳} - \frac{۱۰۰ V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s} - ۱۰۱/۲۵ \left(\frac{-۹۸/۵ V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s}\right) - \left(\frac{-۰/۲۱ V}{۹۹/۵ + ۱/۲۱ R_s}\right)$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۹۲/۵ + ۱/۱۲ R_s}{۹۲۶۱ + ۱/۲۱ R_s}$$

۳۳ـ با فرض $V_{BE} = ۰/۷V$ و $h_{fe} = ۱۰۰$ برای همه ترانزیستورها، ولتاژهای DC نقاط $B_۱$ ، $B_۲$ را در شکل م ـ ۳۳ به دست آورید. همچنین ولتاژ DC خروجی و بهره ولتاژ A_V را محاسبه نمائید؟



شکل م- ۳۳

☑ **راه حل:**

$$I_{E_۱} + I_{E_۲} = ۱mA \quad (I)$$

$$KVL: ۹/۳ (I_{C_۲} + I_{E_۳}) = ۱۰ - V_{BE_۳} = ۱۰ - ۰/۷ = ۹/۳$$

$$\Rightarrow I_{C_۲} + I_{E_۳} = \frac{۹/۳}{۹/۳} = ۱ \Rightarrow \frac{\beta_۲}{۱+\beta_۲} I_{E_۲} + I_{E_۳} = ۱ \Rightarrow \frac{۱۰۰}{۱۰۱} I_{E_۲} + I_{E_۳} = ۱$$

$$\Rightarrow ۱۰۰ I_{E_۲} + ۱۰۱ I_{E_۳} = ۱۰۱ \quad (II)$$

در حلقه $۲۰K\Omega$ و $۱۰K\Omega$ و $۱۰V$ و $-۱۰V$ و $V_{BE_۳}$ و $V_{BE_۱}$ و $۱۰K\Omega$ داریم:

$$KVL: ۱۰ I_{B_۱} - ۱۰ I_{B_۲} + ۲۰ (I_{C_۳} - I_{B_۲}) = ۱۰ - ۰/۷ + ۰/۷ = ۱۰$$

$$\Rightarrow ۱۰ I_{B_۱} - ۳۰ I_{B_۲} + ۲۰ I_{C_۳} = ۱۰ \Rightarrow I_{B_۱} - ۳ I_{B_۲} + ۲ I_{C_۳} = ۱ \Rightarrow \frac{I_{E_۱}}{۱+\beta_۲} - \frac{۳ I_{E_۲}}{۱+\beta_۲} + ۲ \frac{\beta_۳}{۱+\beta_۳} I_{E_۳} = ۱$$

$$\Rightarrow \frac{I_{E_۱}}{۱۰۱} - \frac{۳ I_{E_۲}}{۱۰۱} + \frac{۲۰۰}{۱۰۱} I_{E_۳} = ۱ \Rightarrow I_{E_۱} - ۳ I_{E_۲} + ۲۰۰ I_{E_۳} = ۱۰۱ \quad (III)$$

$$(I), (II), (III): \begin{cases} I_{E_۱} + I_{E_۲} = ۱mA \\ ۱۰۰ I_{E_۲} + ۱۰۱ I_{E_۳} = ۱۰۱ \\ I_{E_۱} - ۳ I_{E_۲} + ۲۰۰ I_{E_۳} = ۱۰۱ \end{cases}$$

www.PnuEB.com

در دو رابطه (II) و (III)، I_{E_3} را حذف می‌کنیم.

$$\begin{cases} 100\times 200\, I_{E_2} + 101\times 200\, I_{E_3} = 101\times 200 \\ -101\, I_{E_1} + 3\times 101\, I_{E_2} - 200\times 101\, I_{E_3} = -101\times 101 \end{cases} \overset{\oplus}{\Rightarrow} 20303\, I_{E_2} - 101\, I_{E_1} = 9999 \quad (IV)$$

$$(I), (IV): \begin{cases} I_{E_1} + I_{E_2} = 1 \\ 20303\, I_{E_2} - 101\, I_{E_1} = 9999 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{E_1} = 0.505\ mA \\ I_{E_2} = 0.459\ mA \end{cases}$$

$$(III) \Rightarrow I_{E_3} = 0.51\ mA$$

$$\Rightarrow V_{B_1} = -10\, I_{B_1} = -10 \times \frac{I_{E_1}}{1+\beta} = -10 \times \frac{0.505}{101} = -0.05V$$

$$V_{B_2} = V_{BE_2} - V_{BE_1} + V_{B_1} = 0.7 - 0.7 - 0.05 = -0.05V$$

$$V_o = 20\, I_{20K} - 10 = 20\,(I_{C_3} - I_{B_2}) - 10 = 20\left(\frac{I_{E_3}\times\beta}{1+\beta} - \frac{I_{E_2}}{1+\beta}\right) - 10$$

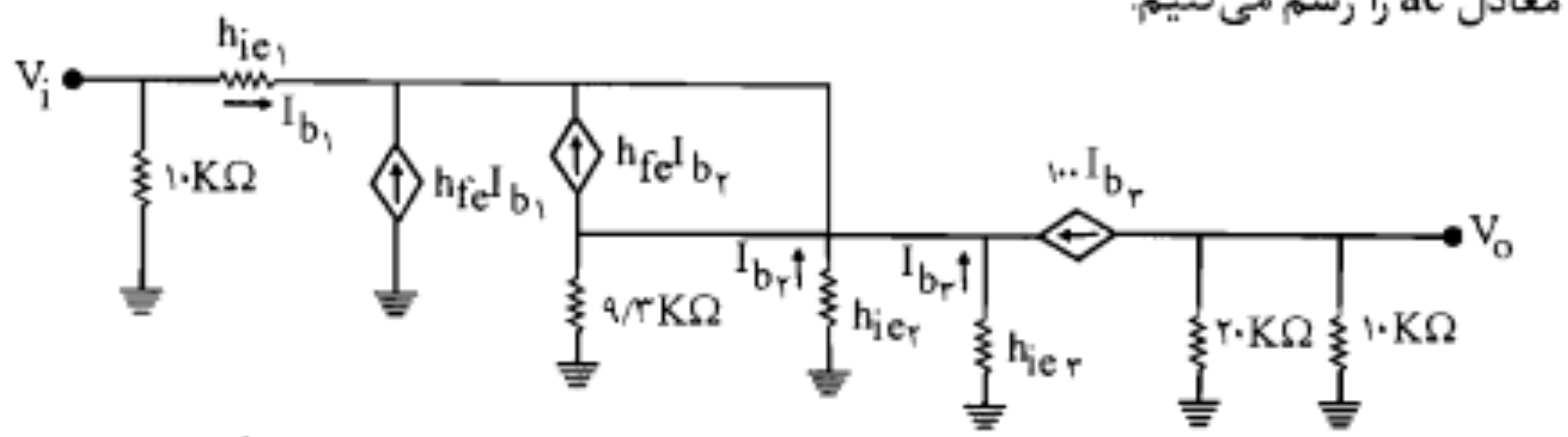
$$= 20\left(\frac{0.51\times 100}{101} - \frac{0.459}{101}\right) - 10 \cong 0$$

$$I_{C_1} = \frac{I_{E_1}\times\beta}{1+\beta} = \frac{0.505\times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_1}} = \frac{100\times 26}{I_{C_1}} = \frac{2600}{0.5} = 5.2K\Omega$$

$$I_{C_2} = \frac{I_{E_2}\times\beta}{1+\beta} = \frac{0.459\times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_2} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_2}} = \frac{26\times 100}{I_{C_2}} = 5.7K\Omega$$

$$I_{C_3} = \frac{I_{E_3}\times\beta}{1+\beta} = \frac{0.51\times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_3} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_3}} = \frac{100\times 26}{I_{C_3}} = 5.15K\Omega$$

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-100\, I_{b_3}\times(20K\Omega \parallel 10K\Omega)}{h_{ie_1}I_{b_1} - h_{ie_2}I_{b_2}} = \frac{-100\, I_{b_3}\times\frac{20}{3}}{5.2\, I_{b_1} - 5.7\, I_{b_2}} \quad (I')$$

$$KCL: I_{b_1} + h_{fe}I_{b_1} + h_{fe}I_{b_2} + I_{b_2} = 0 \Rightarrow (1+100)\, I_{b_1} = -(100+1)\, I_{b_2}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -I_{b_2} \quad (II')$$

حلقه $9.3K\Omega$, h_{ie_3}:

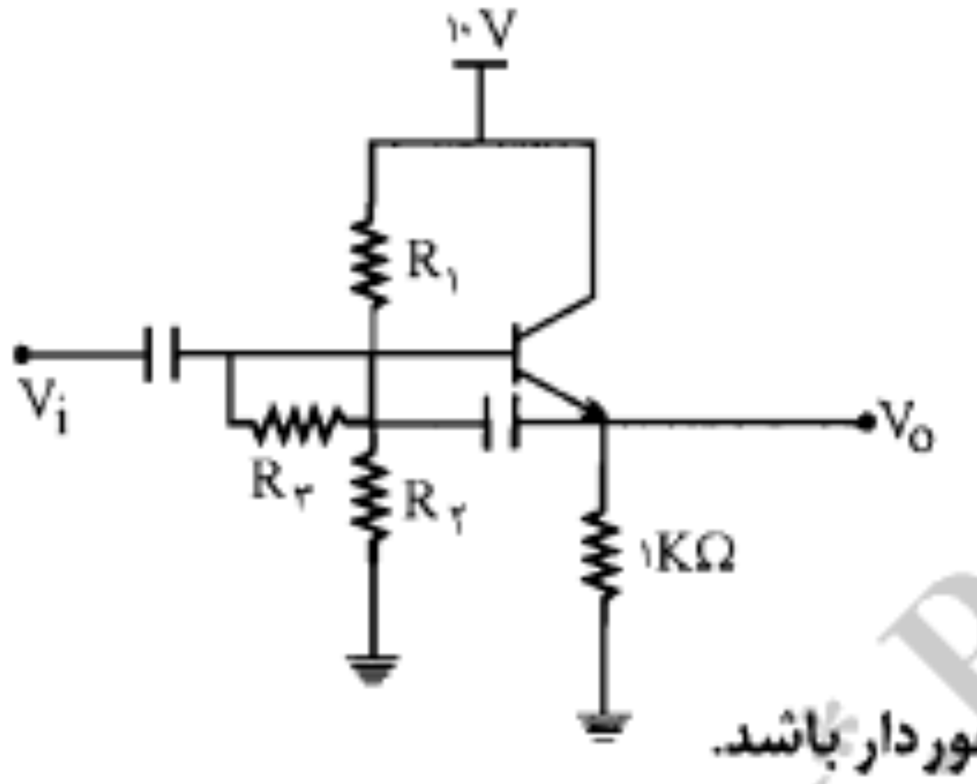
$$KVL: 9.3\, I_{9.3K\Omega} - h_{ie_3}I_{b_3} = 0 \quad (III)' \quad \text{و} \quad I_{9.3K\Omega} = -100\, I_{b_2} - I_{b_2} + 100\, I_{b_3} - I_{b_3}$$

$$\Rightarrow I_{9.3K\Omega} = -101\, I_{b_2} + 99\, I_{b_3}$$

$$(II)' = 9.3(-101\, I_{b_2} + 99\, I_{b_3}) - 5.15\, I_{b_3} = 0 \Rightarrow 920.7\, I_{b_3} = 944.45\, I_{b_2}$$

$$\Rightarrow I_{b_3} = 1.026\, I_{b_2} \quad (IV)'$$

$$(I'): A_V = \frac{-100\times\frac{20}{3}\times I_{b_3}}{5.2\times(-1.026\, I_{b_2}) - 5.7\times 1.026\, I_{b_2}} = 59.61$$



۳۴ ـ در مدار شکل م ـ ۳۴ مقاومت‌های R_1، R_2 و R_3 را طوری محاسبه کنید که شرایط زیر به‌طور همزمان برقرار باشد.

الف) $V_{CEQ} = 5V$ باشد.

ب) به ازای $h_{fe} = 300$ مقاومت ورودی حداکثر شود.

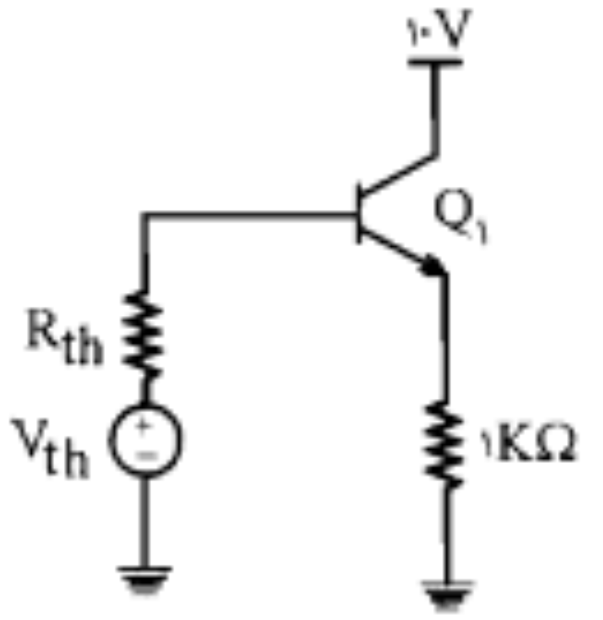
ج) مدار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد.

☑ راه حل:

با اجرای تونن در بیس داریم:

$$\begin{cases} R_{th} = R_3 + (R_1 \parallel R_2) = R_3 + \dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2} \\ V_{th} = V_{CC}\times\dfrac{R_2}{R_1+R_2} = 10\times\dfrac{R_2}{R_1+R_2} \end{cases}$$

و مدار در حالت dc به صورت مقابل در می‌آید:



فرض و $I_C \simeq I_E$:

$$KVL: R_{th}\, I_B + 1K\Omega\, I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th}\times\frac{I_C}{\beta} + I_C = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow$$

$$I_C\left(\frac{R_{th}}{\beta} + 1\right) = V_{th} - V_{BE} \quad (I)$$

www.PnuEB.com

و با توجه به فرض آخر مسئله یعنی پایداری مطلوب نسبت به تغییرات β داریم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} = ۰/۱R_E = ۰/۱\times ۱K\Omega = ۰/۱ \Rightarrow R_{th} = ۰/۱\beta \qquad (II)$$

(II) در (I) جایگزین می‌کنیم:

$$I_C(\frac{۰/۱\beta}{\beta}+۱) = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow I_C(۱/۱) = V_{th} - ۰/۷$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{th}-۰/۷}{۱/۱}$$

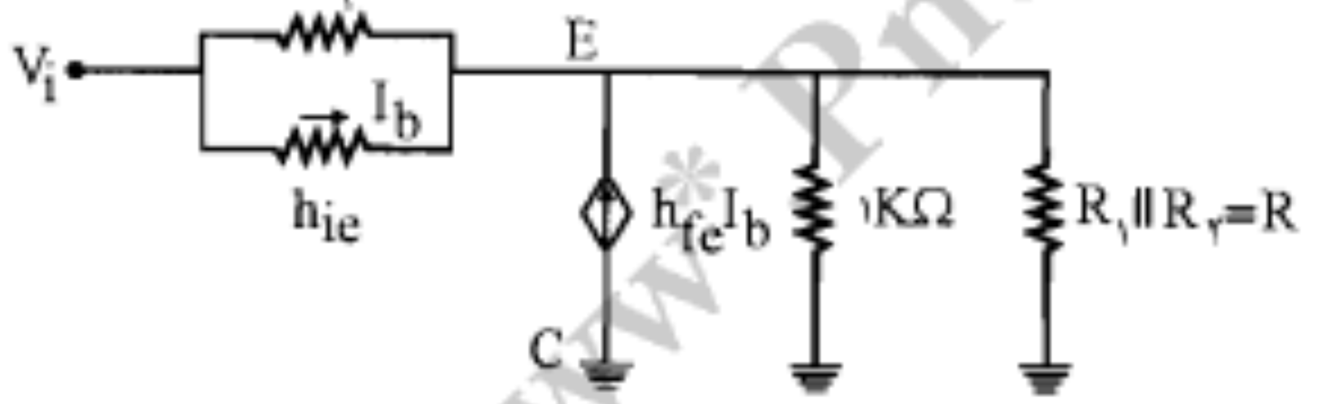
$$KVL: V_{CEQ} = V_{CC} - R_E I_E = ۱۰ - ۱K\Omega \times I_E \quad , \quad I_C \simeq I_E$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = ۱۰ - I_C = ۱۰ - \frac{V_{th}-۰/۷}{۱/۱} = ۵V$$ ($V_{CEQ}=۵V$ فرض مسئله)

$$\Rightarrow V_{th} = -۵/۵ + ۱۱ + ۰/۷ = ۶/۲V \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{th}-۰/۷}{۱/۱} = \frac{۶/۲-۰/۷}{۱/۱} = ۵mA$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{CQ}} = \frac{۳۰۰\times ۲۶}{۵} = ۱/۶K\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر درمی‌آید.



$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie}I_b + (۱+h_{fe})I_b(۱K\Omega \| R) + \frac{h_{ie}I_b}{R_۳}\times(R\|۱K\Omega)}{I_b + \frac{h_{ie}I_b}{R_۳}}$$

$$= \frac{h_{ie}I_b + (۱+h_{fe}+\frac{h_{ie}}{R_۳})I_b\times\frac{R\times ۱}{R+۱}}{I_b+\frac{h_{ie}I_b}{R_۳}} = \frac{h_{ie} + (۱+h_{fe}+\frac{h_{ie}}{R_۳})\times\frac{R}{R+۱}}{۱+\frac{h_{ie}}{R_۳}}$$

$$= \frac{R_۳(R+۱)h_{ie} + RR_۳(۱+h_{fe}) + Rh_{ie}}{(R_۳+h_{ie})(۱+R)}$$

$$h_{fe}=۳۰۰ \Rightarrow R_{th} = ۰/۱\beta \quad (II) \Rightarrow R_{th} = ۰/۱\times۳۰۰ = ۳۰K\Omega$$

از طرفی: $R_{th} = R_۳ + \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = R_۳ + R = ۳۰ \Rightarrow R = ۳۰ - R_۳$

با جایگذاری این مقادیر در R_i داریم:

$$R_i = \frac{R_۳(۳۰-R_۳+۱)\times ۱/۶ + (۳۰-R_۳)R_۳(۱+۳۰۰) + (۳۰-R_۳)\times۱/۶}{(R_۳+۱/۶)(۱+۳۰-R_۳)}$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{۳۰۲/۶R_۳^۲ - ۹۰۷۸R_۳ - ۴۸}{R_۳^۲ - ۲۹/۴R_۳ - ۴۹/۶}$$

طبق فرض ب مسئله مقاومت ورودی باید حداکثر شود پس از رابطه R_i نسبت به $R_۳$ مشتق می‌گیریم و برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$\Rightarrow \frac{dR_i}{dR_۳} = \frac{(۳۰۲/۶\times۲R_۳ - ۹۰۷۸)(R_۳^۲-۲۹/۴R_۳-۴۹/۶) - (۲R_۳-۲۹/۴)(۳۰۲/۶R_۳^۲-۹۰۷۸\times R_۳ - ۴۸)}{(R_۳^۲-۲۹/۴R_۳-۴۹/۶)^۲}$$

$\frac{dR_i}{dR_۳} = ۰ \Rightarrow$ صورت برابر صفر باید باشد $\Rightarrow ۱۸۱/۵۶R_۳^۲ - ۲۹۹۲۱/۹۲R_۳ + ۴۴۸۸۵۷/۶ = ۰$

$$\Rightarrow R_۳^۲ - ۱۶۴/۸R_۳ + ۲۴۷۲/۲ = ۰$$

با حل این معادله درجه ۲ مقادیر $R_۳$ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} R_۳ = ۱۶/۶۹K\Omega \\ R_۳ = ۱۴۸K\Omega \end{cases}$$

طبق رابطه R_{th} داریم: $R_{th} = R_۳ + \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = ۳۰K\Omega$ پس $R_۳$ نمی‌تواند از $۳۰K\Omega$ بیشتر باشد پس $R_۳ = ۱۴۸K\Omega$ قابل قبول نمی‌باشد ولی $R_۳ = ۱۶/۶۹K\Omega$ قابل قبول است.

$$\Rightarrow R_{th} = R_۳ + \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = ۳۰K\Omega \Rightarrow \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = ۳۰ - ۱۶/۶۹ = ۱۳/۳۱ \qquad (A)$$

از طرفی: $V_{th} = \frac{۱۰R_۲}{R_۱+R_۲} = ۶/۲V \Rightarrow \frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۰/۶۲$

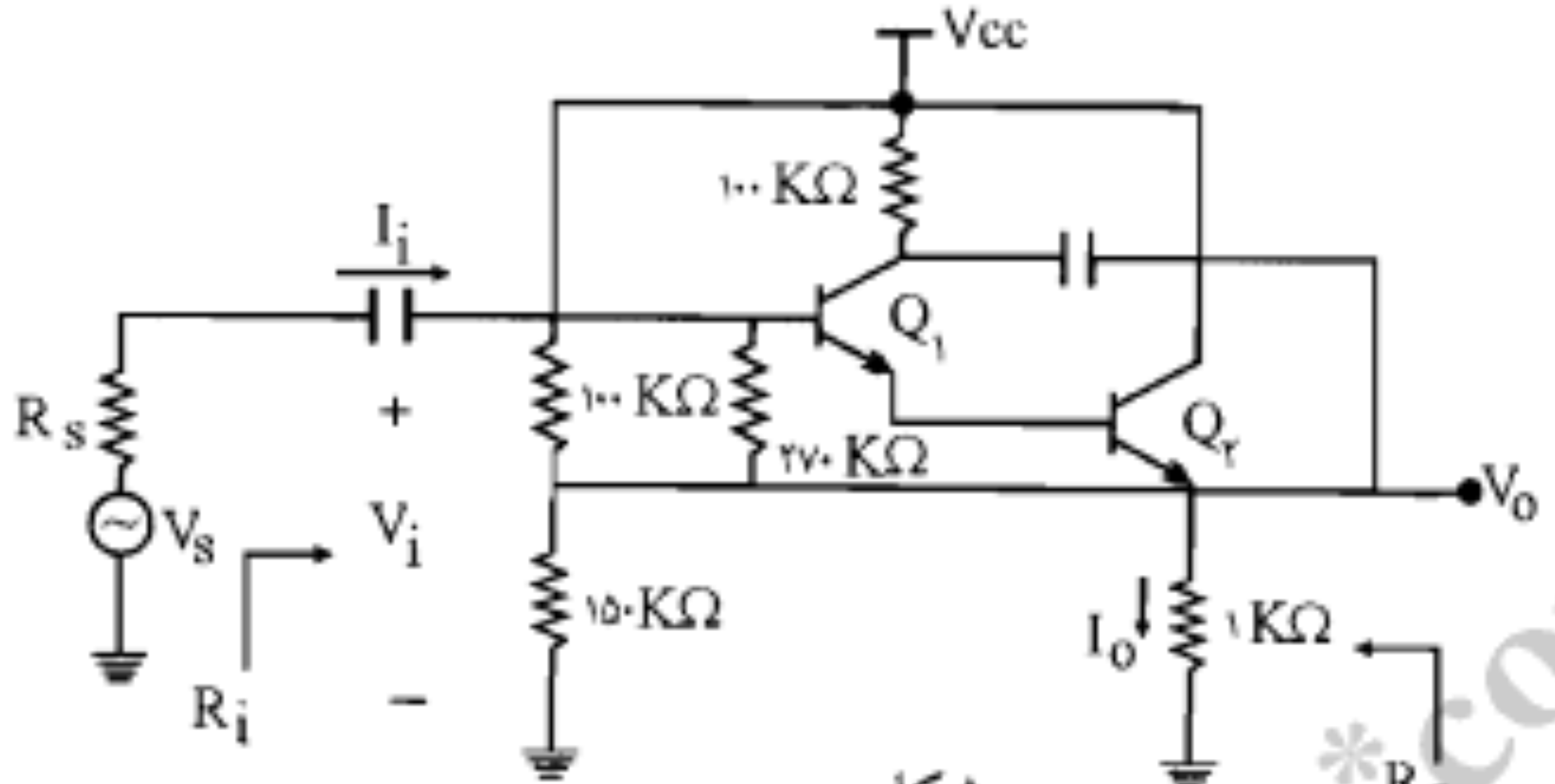
$$\Rightarrow A: R_۱\times\frac{R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۳/۳۱ \Rightarrow R_۱\times ۰/۶۲ = ۱۳/۳۱ \Rightarrow R_۱ = ۲۱/۴۷K\Omega$$

$$\Rightarrow \frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲} = ۱۳/۳۱ \Rightarrow \frac{۲۱/۴۷R_۲}{۲۱/۴۷+R_۲} = ۱۳/۳۱ \Rightarrow ۲۱/۴۷R_۲ = ۲۸۵/۷۶ + ۱۳/۳۱R_۲$$

$$\Rightarrow R_۲ = ۳۵K\Omega$$

www.PnuEB.com

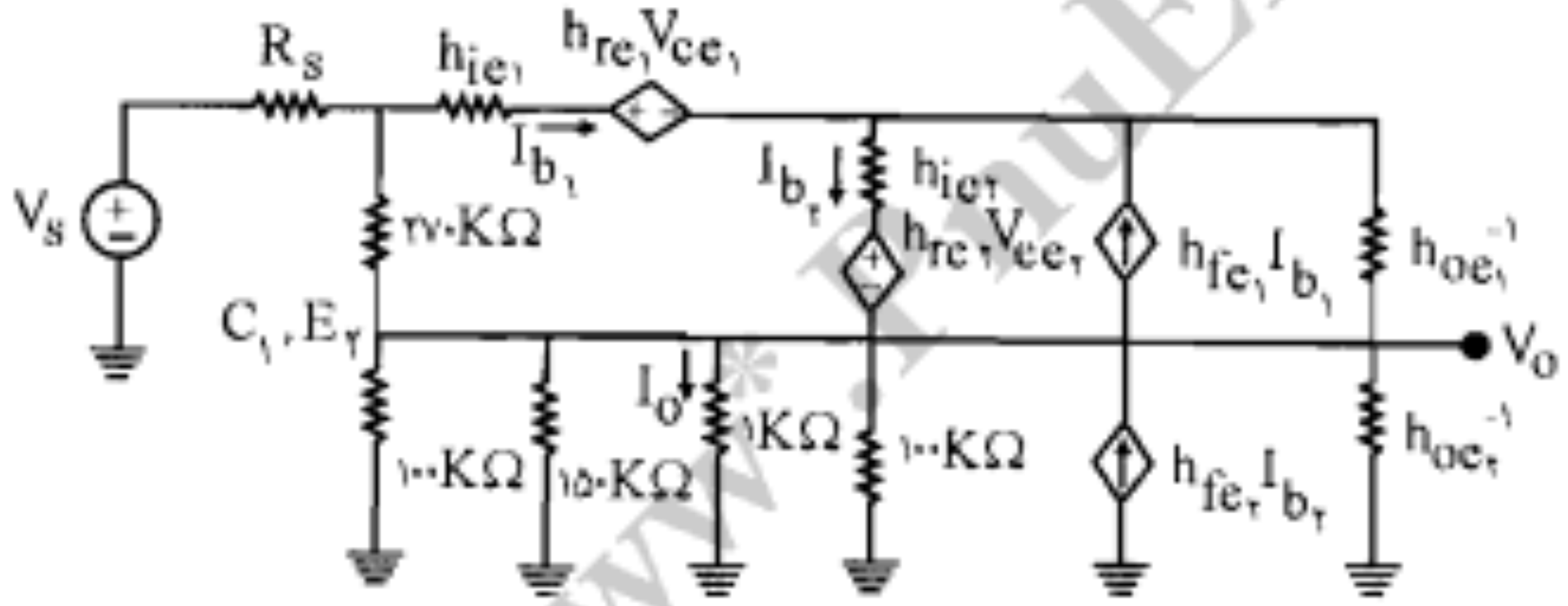
۳۵ ـ در مدار تقویت کننده کلکتور مشترک شکل م ـ ۳۵ با فرض $h_{ie}=۱K\Omega$ ، $h_{oe}^{-1}=۴۰K\Omega$ ، $h_{fe}=۱۰۰$ ، $A_{V_1}=\frac{V_{e_1}}{V_{b_1}}=۰/۹۶$ و $A_{V_2}=\frac{V_{e_2}}{V_{b_2}}=۰/۹۸$ ، مقدار دقیق R_1 را محاسبه کنید و توضیح دهید از چه روشی و چگونه مقاومت ورودی تقویت‌کننده افزایش یافته است؟



شکل م ـ ۳۵

☑ راه حل:

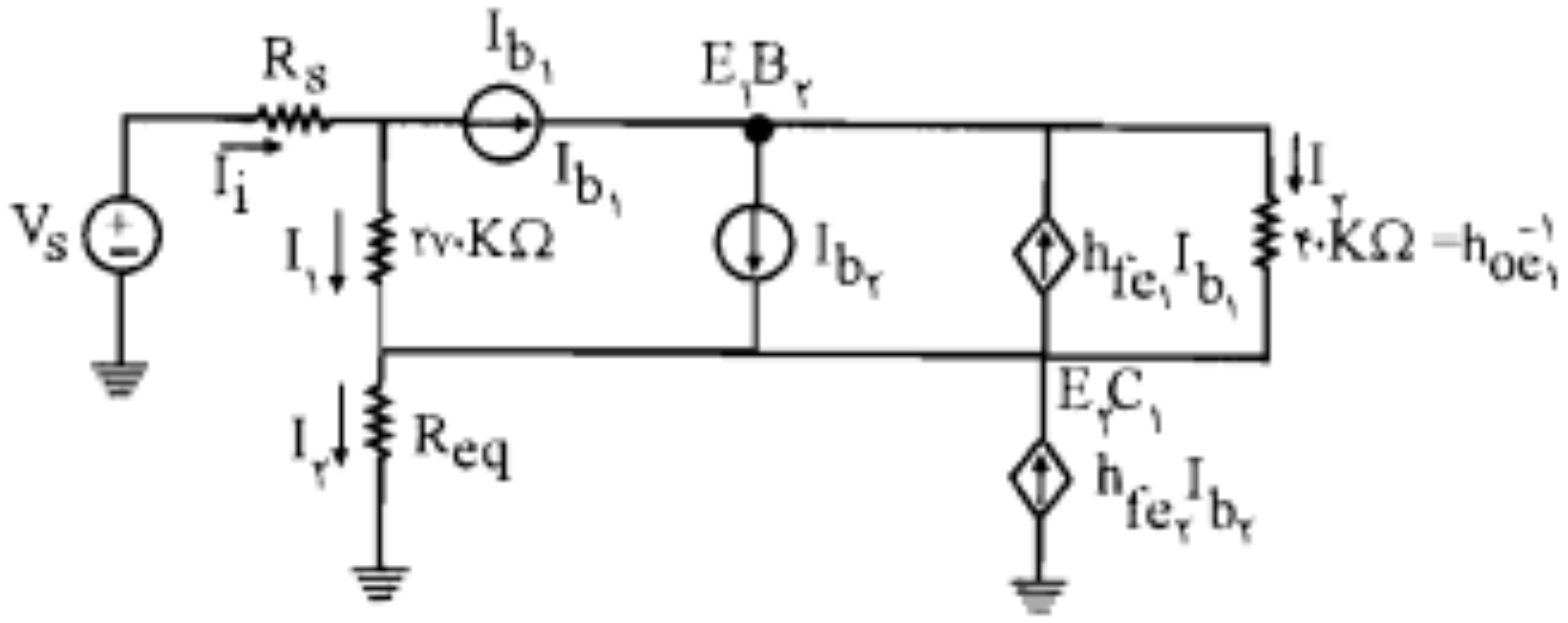
مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



مقاومت معادل مقاومت‌های موازی $h_{oe_2}^{-1}$ و ۱۰۰KΩ و ۱۵۰KΩ و ۱۰۰KΩ را می‌یابیم:

$$R_{eq}=\frac{۱}{\frac{۱}{۱۰۰}+\frac{۱}{۱۵۰}+\frac{۱}{۱}+\frac{۱}{۱۰۰}+\frac{۱}{۴۰}}=۰/۹۵\,K\Omega$$

و به جای شاخه I_{b_1} منبع جریان I_{b_1} و به جای شاخه I_{b_2} منبع جریان I_{b_2} را جایگزین می‌کنیم و مدار معادل را رسم می‌کنیم:



با توجه به فرض مسئله داریم:

$$A_{V_1}=\frac{V_{e_1}}{V_{b_1}}=۰/۹۶$$

با توجه به مدار معادل V_{e_1} و V_{b_1} را می‌یابیم:

$$\begin{cases}V_{e_1}=۴۰I_2+۰/۹۵I_3\\ V_{b_1}=۲۷۰I_1+۰/۹۵I_3\end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_1}=\frac{۴۰I_2+۰/۹۵I_3}{۲۷۰I_1+۰/۹۵I_3}=۰/۹۶\Rightarrow ۴۰I_2+۰/۹۵I_3=۲۵۹/۲I_1+۰/۹۱۲I_3$$

$$۴۰I_2+۰/۰۳۸I_3=۲۵۹/۲I_1 \quad (I)$$

$$\text{فرض مسئله } A_{V_2}=\frac{V_{e_2}}{V_{b_2}}=۰/۹۸\Rightarrow\begin{cases}V_{e_2}=۰/۹۵I_3\\ V_{b_2}=۴۰I_2+۰/۹۵I_3\end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_2}=\frac{۰/۹۵I_3}{۴۰I_2+۰/۹۵I_3}=۰/۹۸\Rightarrow ۰/۹۵I_3=۳۹/۲I_2+۰/۹۳۱I_2$$

$$\Rightarrow ۳۹/۲I_2=۰/۰۱۹I_3\Rightarrow I_3=۲۰۶۳I_2 \quad (II)$$

با جایگذاری (II) در (I) داریم:

$$۴۰I_2+۰/۰۳۸\times ۲۰۶۳I_2=۲۵۹/۲I_1\Rightarrow I_1=۰/۴۵۶I_2$$

$$E_2 \text{ درگره } KCL: ۱۰۰I_{b_2}+I_{b_2}-۱۰۰I_{b_1}+I_2+I_1-I_3=۰$$

$$\Rightarrow ۱۰۱I_{b_2}-۱۰۰I_{b_1}=۲۰۶۳I_2-۰/۴۵۶I_2-I_2=۲۰۶۱I_2 \quad (A)$$

$$E_1 \text{ درگره } KCL: I_{b_1}+۱۰۰I_{b_1}=I_2+I_{b_2}\Rightarrow ۱۰۱I_{b_1}-I_{b_2}=I_2 \quad (B)$$

$$\Rightarrow\begin{cases}۱۰۱I_{b_2}-۱۰۰I_{b_1}=۲۰۶۱I_2\\ -I_{b_2}+۱۰۱I_{b_1}=I_2\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}I_{b_1}=۰/۲۱۴I_2\\ I_{b_2}=۲۰/۶۱I_2\end{cases}$$

$$\text{از طرفی: } R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{V_{b_1}}{I_1+I_{b_1}}=\frac{۲۷۰I_1+۰/۹۵I_3}{۰/۴۵۶I_2+۰/۲۱۴I_2}=\frac{۲۷۰\times ۰/۴۵۶I_2+۰/۹۵\times ۲۰۶۳I_2}{۰/۴۶۵I_2+۰/۲۱۴I_2}$$

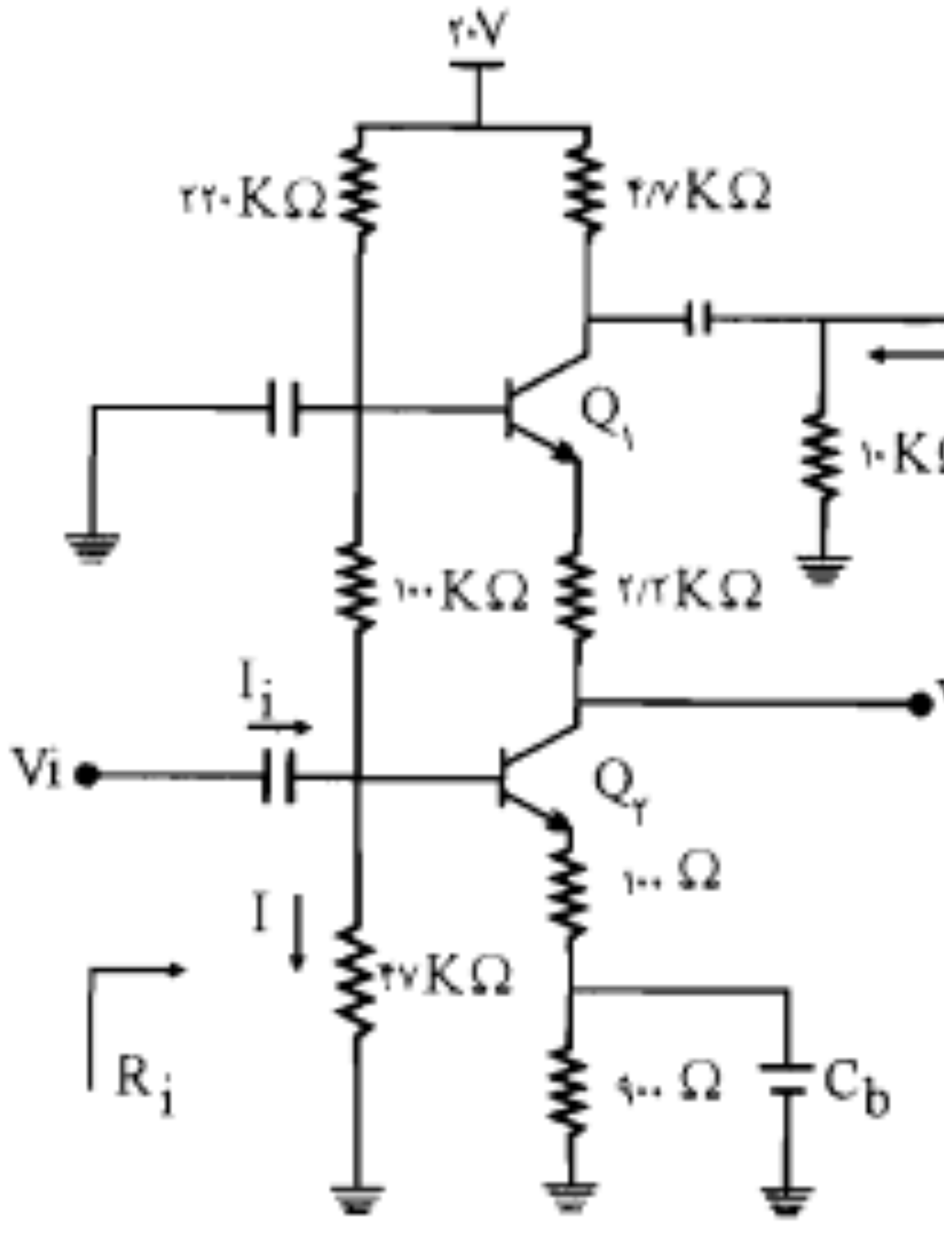
$$R_i=\frac{۲۰۸۲/۹۷}{۰/۶۷}=۳۱۰۸\,K\Omega$$

www.*PnuEB*.com

۳۶ ـ در مدار تقویت کننده شکل م ـ ۳۶ ترانزیستورها مشابه و β آنها بزرگ فرض می‌شود. با فرض $V_{CE}(sat) = 0.2V$ ، $V_{BE(ON)} = 0.7V$ و $h_{re} = h_{oe} \cong 0$ ،

الف) مقادیر جریان I_{CQ} و ولتاژ V_{CEQ} را برای هر یک از ترانزیستورها به دست می‌آید.

ب) مقادیر کمیت‌های A_V ، $A_{V_1} = \frac{V_{O_1}}{V_i}$ ، A_I ، R_i و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م – ۳۶

☑ راه حل:

الف) چون β بسیار بزرگ فرض شده است پس جریان بیس ترانزیستورها صفر می‌شود پس $I_E = I_C$ خواهد شد.

در شاخه مقاومت‌های ۲۲۰KΩ و ۱۰۰KΩ و ۴۷KΩ جریان I را به دست می‌آوریم:

$$I = \frac{20\,V}{220 + 100 + 47} = \frac{20}{367}\,mA$$

حلقه: $47K\Omega \;,\; V_{BE_2} \;,\; 100\Omega \;,\; 900\Omega$

$$KVL: 47I - (0.1 + 0.9)\, I_{E_2} = V_{BE_2} \Rightarrow 47I - I_{C_2} = 0.7 \Rightarrow$$

$$I_{C_2} = 47I - 0.7 = 47 \times \frac{20}{367} - 0.7 = 1.86\,mA$$

از طرفی با توجه به مدار $I_{C_1} = I_{C_2}$

$$\Rightarrow I_{C_2} = I_{C_1} = 1.86\,mA$$

در حلقه ۴۷K و ۱۰۰K و V_{BE} :

$$Q_1: \begin{cases} KVL: V_{E_1} = (47 + 100)\, I - V_{BE_1} \\ \quad \Rightarrow 147 \times \frac{20}{367} - 0.7 = 7.3V \\ KVL: V_{C_1} = 20 - 4.7 I_{C_1} = 20 - 4.7 \times 1.86 = 11.26\,V \end{cases}$$

$$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 11.26 - 7.3 = 3.96\,V$$

$$Q_2: \begin{cases} V_{C_2} = V_{E_1} - 2.2 I_{C_1} = 7.3 - 2.2 \times 1.86 = 3.21\,V \\ V_{E_2} = (100 + 900) \times 10^{-3} I_{C_2} = 1 \times 1.86 = 1.86\,V \end{cases}$$

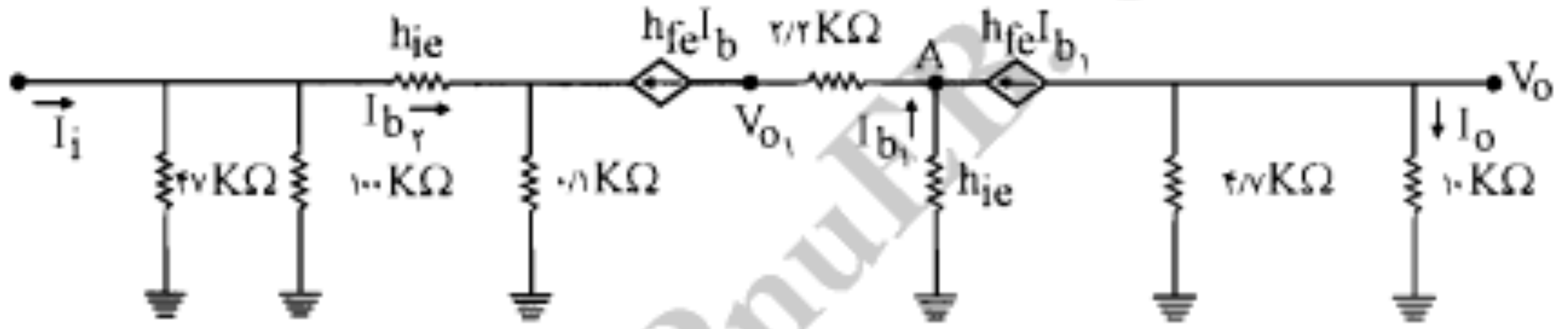
$$\Rightarrow V_{CE_2} = V_{C_2} - V_{E_2} = 3.21 - 1.86 = 1.35\,V$$

ب)

$$I_{C_1} = I_{C_2}$$

$$h_{ie_1} = h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = h_{fe} \times \frac{26}{1.86} = 14 \times 10^{-3} h_{fe}\ K\Omega$$

و چون h_{fe} بسیار بزرگ می‌باشد پس $h_{ie} \to \infty$ ، مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i}\ (I) \begin{cases} I_O = -h_{fe} I_{b_1} \frac{4.7}{4.7 + 10} = \frac{-4.7 h_{fe} I_{b_1}}{14.7} \\ I_i = I_{b_2} + \frac{h_{ie} I_{b_2} + (1 + h_{fe})\, I_{b_2} \times 0.1}{47K \parallel 100K\Omega} \end{cases}$$

به جای $h_{fe} + 1$ مقدار h_{fe} را قرار می‌دهیم.

$$\Rightarrow I_i = I_{b_2} + \frac{(14 \times 10^{-3} h_{fe} + h_{fe} \times 0.1)\, I_{b_2}}{32K\Omega}$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ می‌باشد از I_{b_2} در مقابل کسر بعدی صرفنظر می‌کنیم ⇐

$$I_i = \frac{0.114 I_{b_2} h_{fe}}{32}$$

درگره A: $(1 + h_{fe})\, I_{b_1} = h_{fe} I_{b_2} \Rightarrow I_{b_1} \simeq I_{b_2}$

$$\Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} \qquad (I) \Rightarrow A_I = \frac{\frac{-4.7 h_{fe} I_{b_1}}{14.7}}{\frac{0.114 I_{b_2} h_{fe}}{32}} = \frac{\frac{-4.7 I_{b_1} \times h_{fe}}{14.7}}{\frac{0.114 I_{b_1} \times h_{fe}}{32}}$$

$$\Rightarrow A_I = -۸۹/۷۵$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_{b_۲} + (۱+h_{fe}) \times ۰/۱ I_{b_۱}}{\frac{۰/۱۱۴ I_{b_۲} h_{fe}}{۳۲}} = \frac{۱۴ \times ۱۰^{-۳} h_{fe} + ۰/۱ h_{fe}}{\frac{۰/۱۱۴ h_{fe}}{۳۲}} = ۳۲ K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۸۹/۷۵ \times \frac{۱۰}{۳۲} = -۲۸/۰۵$$

$$V_{O_۱} = -۲/۲ I_{۲/۲K\Omega} - h_{ie} I_{b_۱} = -۲/۲ \times (۱+h_{fe}) I_{b_۱} - h_{ie} I_{b_۱}$$

$$= -(۲/۲ h_{fe} + h_{ie}) I_{b_۱} = -(۲/۲ h_{fe} + ۱۴ \times ۱۰^{-۳} h_{fe}) I_{b_۱}$$

$$= -(۲/۲ + ۱۴ + ۱۰^{-۳})\, h_{fe} I_{b_۱} = -۲/۲۱۴ h_{fe} I_{b_۱}$$

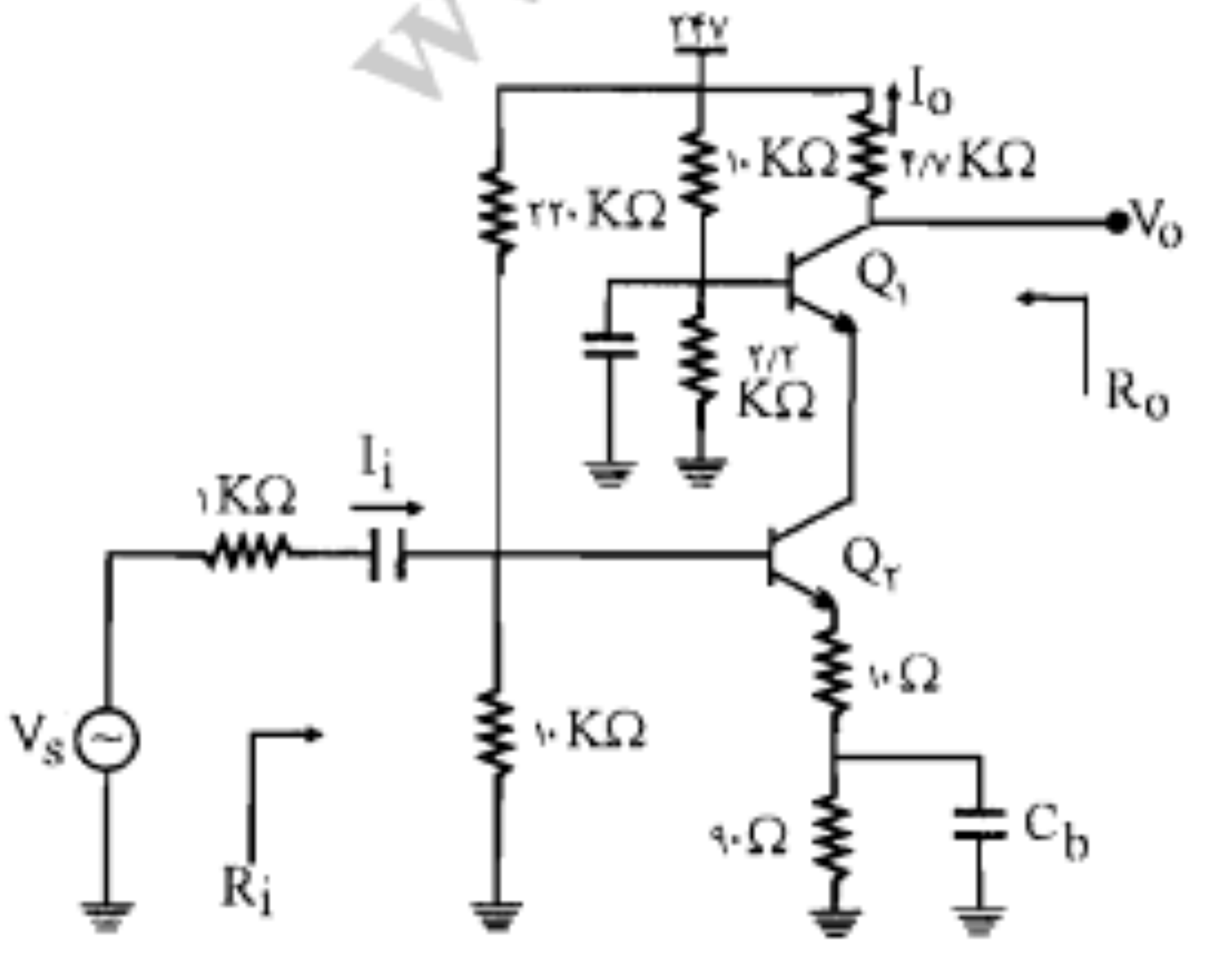
$$A_{V_۱} = \frac{V_{O_۱}}{V_i} = \frac{-۲/۲۱۴ h_{fe} I_{b_۱}}{۰/۱۱۴ h_{fe} I_{b_۲}} = -۱۹/۴۲$$

$$R_O = ۴/۷ \parallel ۱۰ = \frac{۴/۷ \times ۱۰}{۴/۷ + ۱۰} = ۳/۲ K\Omega$$

۳۷ـ در مدار تقویت کننده شکل م ـ ۳۷، β ترانزیستورها بسیار بزرگ است.

الف) مختصات نقطه کار DC هر یک از ترانزیستورها را به دست آورید.

ب) مقادیر A_V ، A_{V_s} ، A_I ، R_i و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۳۷

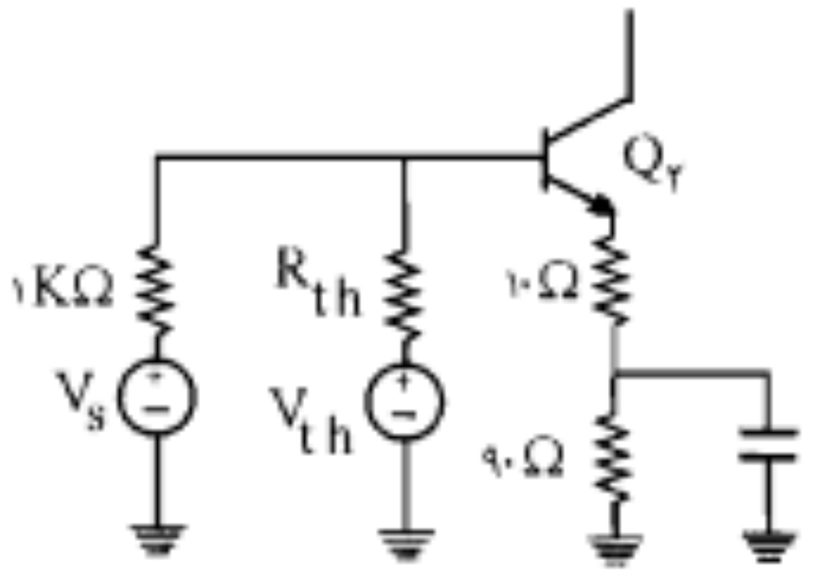
☑ **راه حل:**

$$Q_۲: \begin{cases} R_{th} = ۲۲۰ K\Omega \parallel ۱۰ K\Omega = \frac{۲۲۰ \times ۱۰}{۲۲۰ + ۱۰} = ۹/۵۶ K\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{۱۰ K\Omega}{۲۲۰ + ۱۰} = ۲۴ \times \frac{۱۰}{۲۳۰} = ۱/۰۴۳ V \end{cases}$$

پس ورودی $Q_۲$ به صورت زیر در می‌آید:

$$KVL: V_{th} - V_{BE_۱} = R_{th} I_{B_۲} + \frac{(۱۰+۹۰)}{۱۰^۳} I_{E_۲} \Rightarrow$$

چون β ترانزیستور بسیار بزرگ است پس $I_{B_۲} = ۰$ می‌باشد و $I_{C_۲} = I_{E_۲}$



$$\Rightarrow V_{th} - V_{BE_۱} = ۰/۱ I_{C_۲} \Rightarrow I_{C_۲} = \frac{۱/۰۴۳ - ۰/۷}{۰/۱} = ۳/۴۳ \text{ mA}$$

از طرفی: $I_{C_۱} = I_{C_۲} \Rightarrow I_{C_۱} = ۳/۴۳ \text{mA}$

در حلقه V_{CC} و ۱۰ KΩ و ۲/۲ KΩ داریم:

$$I = \frac{۲۴ v}{۲/۲ + ۱۰} = ۱/۹۶۷ \text{ mA}$$

در حلقه ۴/۷KΩ و $V_{CE_۱}$ و $V_{BE_۱}$ و ۱۰ KΩ :

$$KVL: ۱۰ I - ۴/۷ I_{C_۱} = V_{CE_۱} - V_{BE_۱} \Rightarrow ۱۰ \times ۱/۹۶۷ - ۴/۷ \times ۳/۴۳ + ۰/۷ = V_{CE_۱}$$

$$\Rightarrow V_{CE_۱} = ۴/۲۵ V$$

در حلقه V_{CC} و ۴/۷KΩ و $V_{CE_۱}$ و $V_{CE_۲}$ و ۱۰ Ω و ۹۰ Ω داریم:

$$KVL: ۴/۷ I_{C_۱} + \frac{(۱۰+۹۰)}{۱۰^۳} I_{C_۲} = -V_{CE_۱} - V_{CE_۲} + ۲۴$$

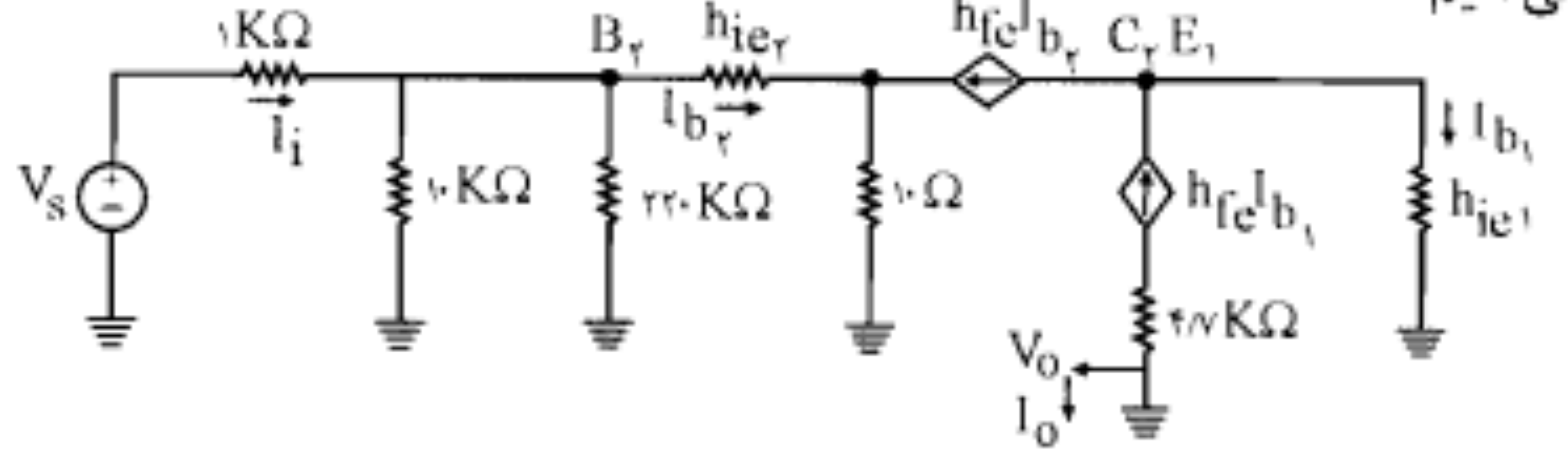
$$\Rightarrow V_{CE_۲} = ۲۴ - ۴/۲۵ - ۴/۷ \times ۳/۴۳ - ۰/۱ \times ۳/۴۳ = ۳/۲۹ V$$

ب)

$$\begin{cases} h_{ie_۱} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_۱}} = \frac{h_{fe} \times ۲۶}{۳/۴۳} = ۷/۵ h_{fe} \Omega = ۷/۵۸ \times ۱۰^{-۳} h_{fe} K\Omega \\ h_{ie_۲} = ۷/۵۸ h_{fe} \end{cases}$$

www.PnuEB.*.com
www.PnuEB.*.com

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_I=\frac{I_O}{I_i}=\frac{-h_{fe}I_{b_۱}}{I_{b_۲}+\frac{V_{B_۲}}{۱۰KΩ \parallel ۲۲۰KΩ}}=\frac{-h_{fe}I_{b_۱}}{I_{b_۲}+\frac{V_{B_۲}}{۹/۵۶}} \quad (I)$$

$$V_{B_۲}=(۱+h_{fe})I_{b_۲}\times ۱۰\times ۱۰^{-۳}+h_{ie_۲}I_{b_۲}$$

در گره $C_۲$ و $E_۱$ داریم: $h_{fe}I_{b_۲}=(۱+h_{fe})I_{b_۱} \Leftarrow h_{fe}I_{b_۱}+I_{b_۱}=h_{fe}I_{b_۲}$

$$\Rightarrow h_{fe}I_{b_۲}\cong h_{fe}I_{b_۱} \Rightarrow I_{b_۱}\simeq I_{b_۲}$$

$$(I): A_I=\frac{-h_{fe}I_{b_۱}}{I_{b_۱}+\frac{h_{fe}I_{b_۱}\times ۱۰^{-۲}+h_{fe}\times ۷/۵۸ I_{b_۱}\times ۱۰^{-۳}}{۹/۵۶}}$$

و چون h_{fe} بسیار بزرگ است در مخرج A_I از $I_{b_۱}$ در مقابل کسر بعدی صرفنظر می‌کنیم:

$$\Rightarrow A_I=\frac{-h_{fe}I_{b_۱}}{\frac{h_{fe}I_{b_۱}\times ۱۰^{-۲}+h_{fe}I_{b_۱}\times ۷/۵۸\times ۱۰^{-۳}}{۹/۵۶}}=\frac{-۹/۵۶}{۷/۵۸\times ۱۰^{-۳}+۱۰^{-۲}}=-۵۴۴$$

$$R_i=\frac{V_i}{I_i}=\frac{V_i}{\frac{V_i}{۹/۵}+I_{b_۲}}=\frac{V_i}{\frac{V_i}{۹/۵۶}+I_{b_۱}}=\frac{۱}{\frac{۱}{۹/۵۶}+\frac{I_{b_۱}}{V_i}}$$

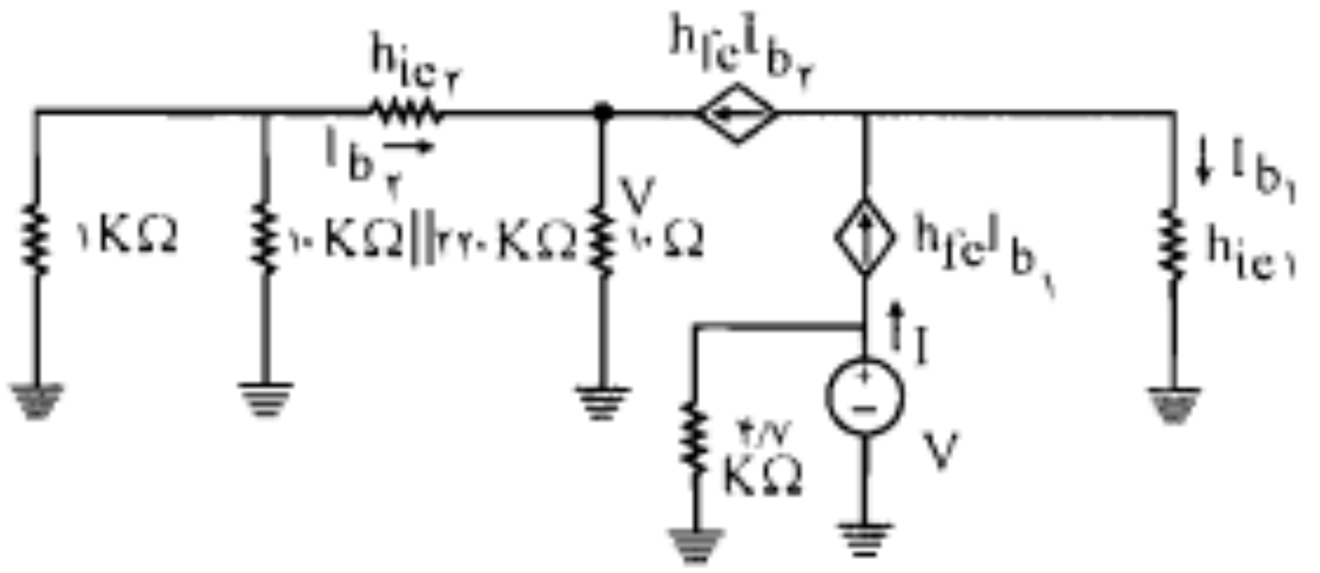
$$\Rightarrow R_i=\frac{۱}{\frac{۱}{۹/۵۶}+\frac{I_{b_۱}}{h_{ie_۲}I_{b_۲}+(۱+h_{fe})I_{b_۲}\times ۰/۰۱}}=\frac{۱}{\frac{۱}{۹/۵۶}+\frac{I_{b_۱}}{h_{ie_۲}I_{b_۱}+h_{fe}I_{b_۱}\times ۰/۰۱}}$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ است در مخرج R_i کسر دوم یعنی $\frac{I_{b_۱}}{h_{ie_۲}I_{b_۱}+h_{fe}I_{b_۱}\times ۰/۰۱}$ برابر صفر می‌شود

$$\Rightarrow R_i=\frac{۱}{\frac{۱}{۹/۵۶}}=۹/۵۶\,KΩ \qquad A_V=A_I\times\frac{R_L}{R_i}=-۵۴۴\times\frac{۴/۷}{۹/۵۶}=-۲۶۷$$

$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=-۲۶۸\times\frac{۹/۵۶}{۹/۵۶+۱}=-۲۴۲$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر قرار می‌دهیم.

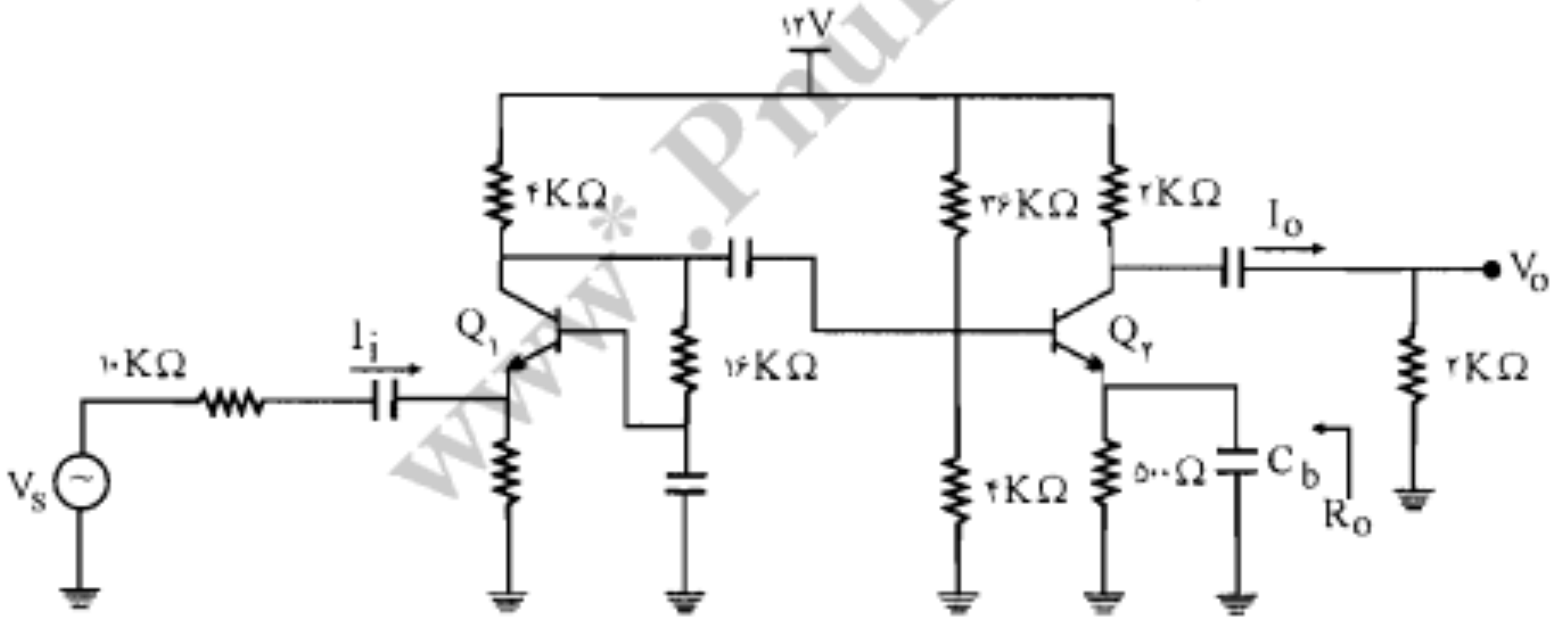


$$R_O=\frac{V}{I}=۴/۷KΩ$$

۳۸ ـ در مدار تقویت کننده شکل م ـ ۳۸ با فرض $h_{fe}=۵۰$ و $h_{re}=h_{oe}\cong ۰$ برای هر دو ترانزیستور

الف) نقطه کار هر یک از ترانزیستورها را تعیین کنید؟

ب) مقادیر R_i ، A_V ، A_{V_s} ، A_I و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م-۳۸

☑ **راه حل:**

الف) حلقه: V_{CC} , ۴KΩ , ۱۶KΩ , $V_{BE_۱}$, ۸۰Ω

$$KVL: ۴(I_{C_۱}+I_{B_۱})+۱۶I_{B_۱}+۸۰\times ۱۰^{-۳}I_{E_۱}=۱۲-V_{BE_۱}=۱۲-۰/۷=۱۱/۳$$

$$\Rightarrow ۴I_{E_۱}+\frac{۱۶\times I_{E_۱}}{۱+\beta_۱}+۰/۰۸I_{E_۱}=۱۱/۳ \Rightarrow I_{E_۱}=\frac{۱۱/۳}{۴/۳۹}$$

$$\Rightarrow I_{C_۱}=\frac{\beta}{۱+\beta}I_{E_۱}=\frac{۵۰}{۵۱}\times\frac{۱۱/۳}{۴/۳۹}=۲/۵۲\,mA$$

$$\Rightarrow V_{CE_۱Q}=V_{CC}-(۴+۸۰\times ۰۱^{-۳})I_{E_۱}=۱۲-۴/۰۸\times\frac{۱۱/۳}{۴/۳۹}=۱/۵V$$

www.PnuEB.com

$$Q_۲:\begin{cases} R_{th} = ۴K\Omega \parallel ۳۶K\Omega = ۳/۶K\Omega \\ V_{th} = V_{CC}\times\frac{۴K\Omega}{۴+۳۶} = ۱۲\times\frac{۴}{۴۰} = ۱/۲V \end{cases}$$

$$KVL: R_{th} I_{B_۲} + ۵۰۰\times۱۰^{-۳} I_{E_۲} = V_{th} - V_{BE_۲} = ۱/۲ - ۰/۷ = ۰/۵$$

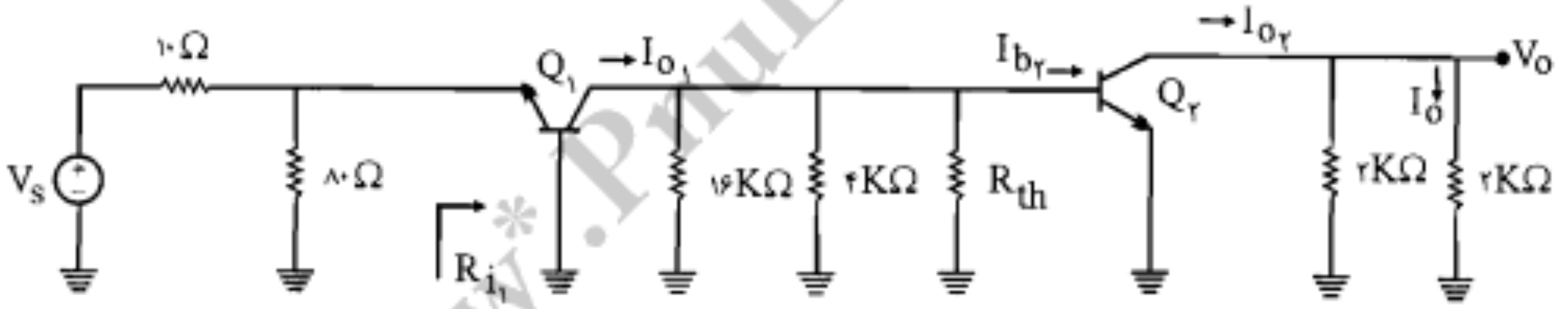
$$\Rightarrow ۳/۶ I_{B_۲} + ۰/۵\times۵۱ I_{B_۲} = ۰/۵ \Rightarrow I_{B_۲} = \frac{۵}{۲۹۱}mA \Rightarrow I_{C_۲} = ۵۰ I_{B_۲} = ۰/۸۶mA$$

$$\Rightarrow V_{CE_۲Q} = V_{CC} - ۲I_{C_۲} - ۰/۵I_{E_۲} = ۱۲ - ۲/۵I_{C_۲} = ۱۲ - ۲/۵I_{C_۲} = ۱۲ - ۲/۵\times۰/۸۶ = ۹/۸۵V$$

ب)

$$\begin{cases} h_{ie_۱} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_۱}} = \frac{۵۰\times۲۶}{۲/۵۲} = ۰/۵۲K\Omega \\ h_{ie_۲} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_۲}} = \frac{۵۰\times۲۶}{۰/۸۶} = ۱/۵K\Omega \end{cases}$$

مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{I_{O_۲}}\times\frac{I_{O_۲}}{I_{b_۲}}\times\frac{I_{b_۲}}{I_{O_۱}}\times\frac{I_{O_۱}}{I_{e_۱}}\times\frac{I_{e_۱}}{I_i} \qquad (I)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{I_{O_۲}}{I_{b_۲}} = -h_{fe} = -۵۰ \quad , \quad \frac{I_{O_۱}}{I_{e_۱}} = \frac{h_{fe}}{۱+h_{fe}} = \frac{۵۰}{۵۱} \\ \frac{I_O}{I_{O_۲}} = ? \quad \text{با استفاده از تقسیم جریان}: I_O = \frac{I_{O_۲}\times۲K\Omega}{۲+۲} = \frac{I_{O_۲}}{۲} \Rightarrow \frac{I_O}{I_{O_۲}} = \frac{۱}{۲} \\ \frac{I_{b_۲}}{I_{O_۱}} = ? \quad I_{b_۲} = I_{O_۱}\times\frac{(۱۶K\Omega\parallel۴K\Omega\parallel R_{th})}{(۱۶K\Omega\parallel۴K\Omega\parallel R_{th})+h_{ie_۲}} = \frac{I_{O_۱}\times۱/۶۹}{۱/۶۹+۱/۵} = ۰/۵۳I_{O_۱} \\ \Rightarrow \frac{I_{b_۲}}{I_{O_۱}} = ۰/۵۳ \\ \frac{I_{e_۱}}{I_i} = ? \Rightarrow I_{e_۱} = \frac{I_i\times(۱۰\parallel۸۰)}{(۱۰\parallel۸۰)+h_{ie_۱}} = I_i\times\frac{۹}{۹+۰/۵۲} = ۰/۹۴ \end{cases}$$

$$\Rightarrow (I): A_I = \frac{۱}{۲}\times(-۵۰)\times۰/۵۳\times\frac{۵۰}{۵۱}\times۰/۹۴ = -۱۲/۲$$

$$R_{i_۲} = h_{ie_۲} = ۱/۵K\Omega$$

$$R_{L_۲} = ۲K\Omega\parallel۲K\Omega = ۱K\Omega = R_O$$

$$R_{L_۱} = ۱۶K\Omega\parallel۴K\Omega\parallel R_{th}\parallel R_{i_۲} = ۱۶K\Omega\parallel۴K\Omega\parallel۳/۶K\Omega\parallel۱/۵K\Omega = ۰/۸K\Omega$$

$$R_{i_۱} = \frac{h_{ie_۱}}{۱+h_{fe}} = \frac{۰/۵۲}{۵۱} = ۱۰\Omega$$

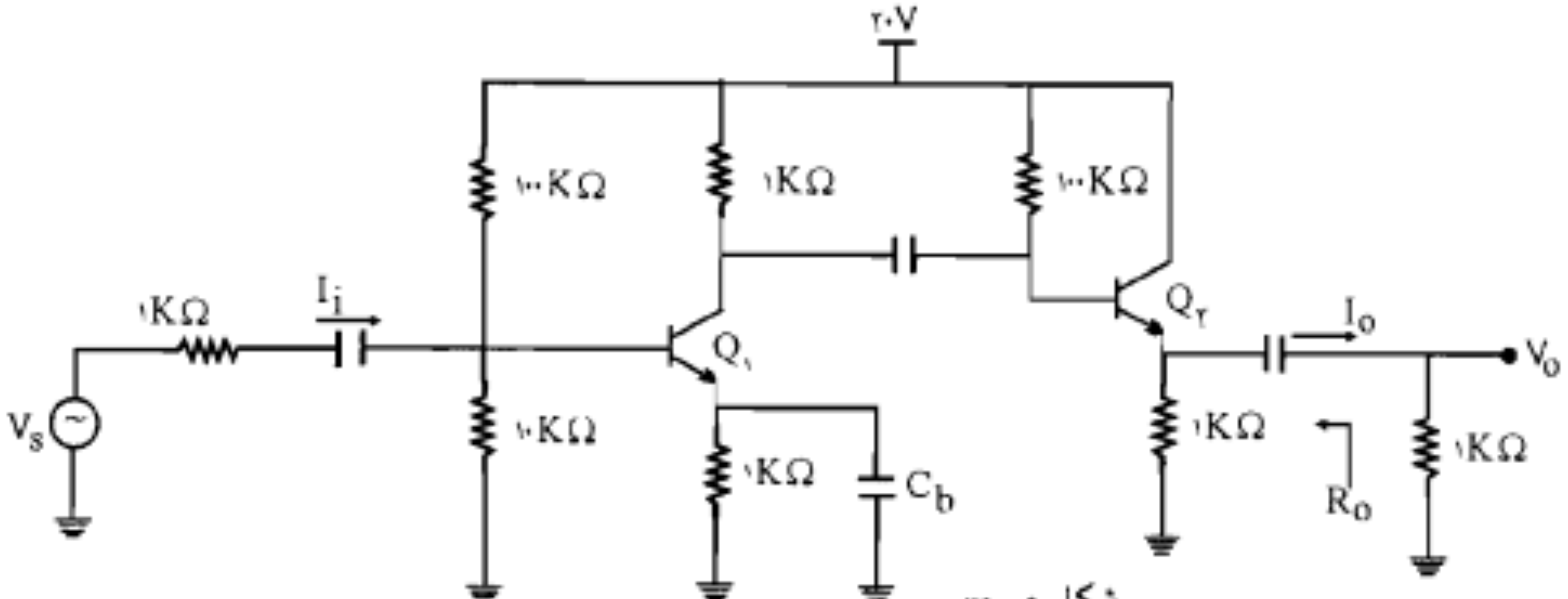
$$R_i = ۸۰\Omega\parallel R_{i_۱} = ۸۰\Omega\parallel۱۰\Omega = \frac{۸۰\times۱۰}{۸۰+۱۰} = ۸/۸۹K\Omega$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_{e_۱}} = \frac{V_O}{V_{b_۲}}\times\frac{V_{b_۲}}{V_{e_۱}} \Rightarrow \begin{cases} \frac{V_O}{V_{b_۲}} = \frac{I_{O_۲}\times R_{L_۲}}{I_{b_۲}\times R_{i_۲}} = \frac{I_{O_۲}}{I_{b_۲}}\times\frac{R_{L_۲}}{R_{i_۲}} = -۵۰\times\frac{۱K\Omega}{۱/۵} = \frac{-۵۰}{۱/۵} \\ \frac{V_{b_۲}}{V_{e_۱}} = \frac{I_{O_۱}\times(R_{L_۱})}{I_{e_۱}\times R_{i_۱}} = \frac{I_{O_۱}}{I_{e_۱}}\times\frac{R_{L_۱}}{R_{i_۱}} = \frac{۵۰}{۵۱}\times\frac{۰/۸}{۱۰\times۱۰^{-۳}} = ۷۸/۴ \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_{e_۱}} = \frac{-۵۰}{۱/۵}\times۷۸/۴ = -۲۶۱۳$$

$$A_{V_s} = A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s} = -۲۶۱۳\times\frac{۸/۸۹}{۸/۸۹+۱۰} = -۱۲۳۰$$

۳۹ ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۳۹ ترانزیستورها مشابه‌اند. با فرض $h_{fe} = ۱۰۰$ الف) مختصات نقطه کار DC ترانزیستورها را تعیین کنید؟ ب) R_i ، A_I ، A_V و R_O را به دست آورید؟ ج) حداکثر دامنه نوسان متقارن برای $V_{ce_۱}$ و $V_{ce_۲}$ را به دست آورده و از آنجا حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ ورودی V_s را محاسبه کنید؟



شکل م–۳۹

☑ راه حل:

الف) در بیس $Q_۱$ تونن را اجرا می‌کنیم:

$$Q_۱:\begin{cases} R_{th} = ۱۰K\Omega \parallel ۱۰۰K\Omega = \frac{۱۰\times ۱۰۰}{۱۰+۱۰۰} = ۹/۱K\Omega \\ V_{th} = ۲۰\times \frac{۱۰}{۱۰+۱۰۰} = ۱/۸۲V \end{cases}$$

حلقه: $R_{th}, V_{BE_۱}, ۱K\Omega, V_{th}$

$$KVL: R_{th} I_{B_۱} + ۱K\Omega \times I_{E_۱} = V_{th} - V_{BE_۱} \Rightarrow ۹/۱ I_{B_۱} + (۱+\beta) = ۱/۸۲ - ۰/۷ = ۱/۱۲$$

$$\Rightarrow I_{B_۱} = \frac{۱/۱۲}{۹/۱+۱۰۱} = ۰/۰۱۰۲mA \Rightarrow I_{C_۱} = \beta I_{B_۱} = ۱۰۰\times ۰/۰۱۰۲ = ۱/۰۲mA$$

$$\Rightarrow h_{ie_۱} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_۱}} = \frac{۱۰۰\times ۲۶}{۱/۰۲} = ۲/۵۵K\Omega$$

حلقه: $۲۰V,\ ۱K\Omega, V_{CE_۱},\ ۱K\Omega$

$$KVL: V_{CE_۱} = ۲۰ - ۱\times I_{C_۱} - ۱\times I_{E_۱} = ۲۰ - ۱/۰۲\times ۱ - ۱\times \frac{۱+۱۰۰}{۱۰۰}\times ۱/۰۲ = ۱۷/۹۵V$$

$$\Rightarrow Q_۱:\begin{cases} I_{C_۱} = ۱/۰۲mA \\ V_{CE_۱} = ۱۷/۹۵V \end{cases}$$

حلقه: $۲۰V,\ ۱۰۰K\Omega, V_{BE_۲}, ۱K\Omega$

$$Q_۲: ۱۰۰I_{B_۲} + ۱\times I_{E_۲} = ۲۰ - V_{BE_۲} = ۲۰ - ۰/۷ = ۱۹/۳ \Rightarrow$$

$$۱۰۰I_{B_۲} + (۱+۱۰۰)I_{B_۲} = ۱۹/۳ \Rightarrow I_{B_۲} = ۰/۰۹۶\ mA$$

$$\Rightarrow I_{C_۲} = \beta I_{B_۲} = ۱۰۰\times ۰/۰۹۶ = ۹/۶mA$$

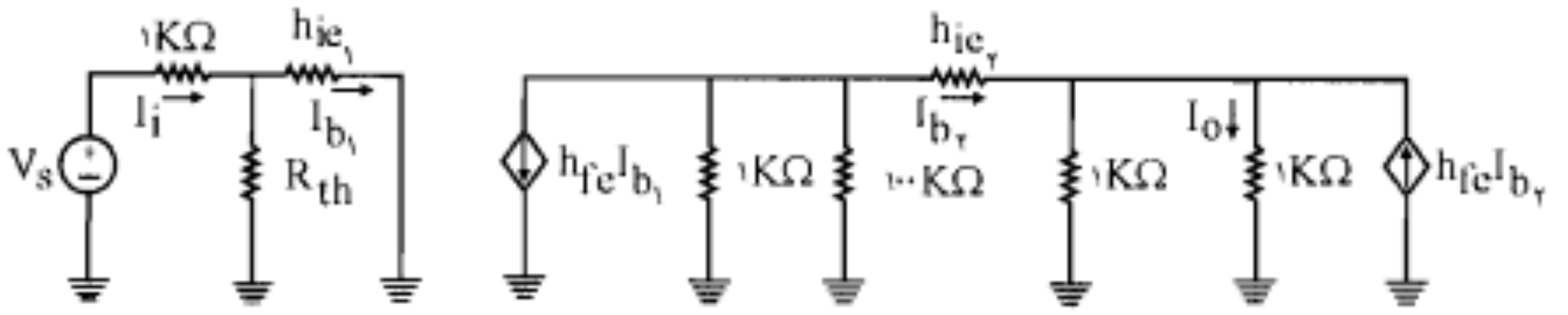
$$h_{ie_۲} = \frac{h_{fe}V_T}{I_{C_۲}} = \frac{۱۰۰\times ۲۶}{۹/۶} = ۲۷۰/۸\Omega = ۰/۲۷\ K\Omega$$ الف)

حلقه: $۲۰V, V_{CE_۲}, ۱K\Omega$

$$V_{CE_۲} = ۲۰ - ۱\times I_{E_۲} = ۲۰ - ۱\times\frac{۱+\beta}{\beta}I_{C_۲} = ۲۰ - \frac{۱۰۱}{۱۰۰}\times ۹/۶ = ۱۰/۳۰۴\ V$$

$$Q_۲:\begin{cases} I_{C_۲} = ۹/۶\ mA \\ V_{CE_۲} = ۱۰/۳۰۴V \end{cases}$$

ب) مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



با استفاده از تقسیم جریان

$$A_I = \frac{I_O}{I_i}\quad (I)\quad \begin{cases} I_O = \frac{(h_{fe}I_{b_۲} + I_{b_۲})\times ۱K\Omega}{۱K\Omega + ۱K\Omega} \\ = ۵۰/۵I_{b_۲} \\ I_i = I_{b_۱} + \frac{h_{ie_۱}I_{b_۱}}{R_{th}} = I_{b_۱} + \frac{۲/۵۵I_{b_۱}}{۹/۱} \end{cases}$$

حلقه: $(۱K\Omega \parallel ۱۰۰K\Omega)\ ,\ (۱K\Omega \parallel ۱K\Omega)\ ,\ h_{ie_۲}$

$$KVL: h_{ie_۲}I_{b_۲} + (I_{b_۲} + ۱۰۰I_{b_۱})\times(۱K\Omega \parallel ۱۰۰K\Omega) + (I_{b_۲} + ۱۰۰I_{b_۲})\times(۱K\Omega \parallel ۱K\Omega) = ۰$$

$$\Rightarrow ۰/۲۷I_{b_۲} + ۰/۹۹I_{b_۲} + ۹۹I_{b_۱} + ۵۰/۵I_{b_۲} = ۰ \Rightarrow$$

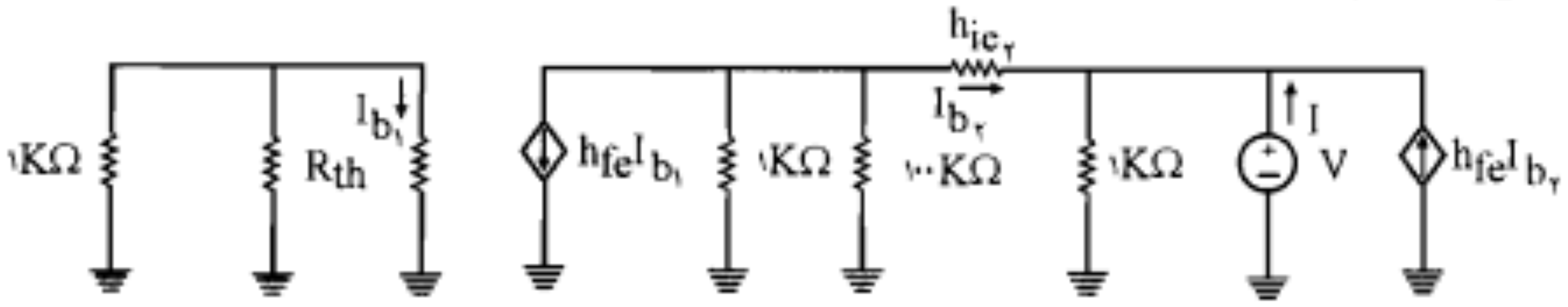
$$۹۹I_{b_۱} + ۵۱/۷۶I_{b_۲} = ۰ \Rightarrow I_{b_۲} = -۱/۹۱I_{b_۱}$$

$$(I): A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{۵۰/۵I_{b_۲}}{I_{b_۱} + ۰/۲۸I_{b_۱}} = \frac{۵۰/۵\times(-۱/۹۱)I_{b_۱}}{۱/۲۸I_{b_۱}} = -۷۵/۳۵$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = ۹/۱K\Omega \parallel h_{ie_۱} = \frac{۹/۱\times ۲/۵۵}{۹/۱+۲/۵۵} = ۱/۹۹K\Omega$$

$$A_V = A_I\times\frac{R_L}{R_i} = (-۷۵/۳۵)\times\frac{۱}{۱/۹۹} = -۳۷/۸۶$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی در دو سر مقاومت ۱KΩ قرار می‌دهیم و منبع ورودی را بی‌اثر می‌نماییم. $Ib_۱$ نیز صفر می‌شود.



$$R_O = \frac{V}{I}\quad ,\quad I = \frac{V}{۱K\Omega} + \frac{V}{۱K\Omega} - (۱+h_{fe})I_{b_۲} = ۲v - ۱۰۱I_{b_۲}\quad (I)$$

www.PnuEB.com

حلقه: $(1K\Omega \,||\, 100K\Omega)$, h_{ie_2} , V

$$KVL: (1K\Omega \,||\, 100K\Omega)\times(I_{b_2}+100 I_{b_1})+h_{ie_2}I_{b_2}=-V$$

$$\Rightarrow 0/99 I_{b_2}+0/27 I_{b_2}=-V \Rightarrow I_{b_2}=\frac{-V}{1/26} \quad (II)$$

(II) را در (I) جایگذاری می‌کنیم.

$$I=2V-101\times\frac{-V}{1/26}=2V+(V\times 80/2)$$
$$=82/2\,V$$
$$\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=\frac{1}{8/22}=12\Omega$$

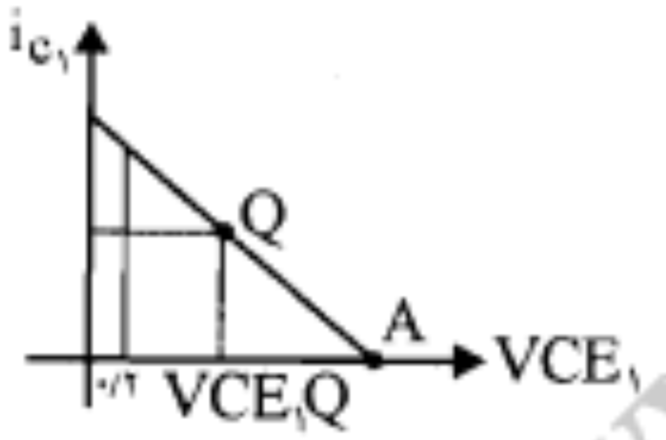
ج) Q_1 ac معادله خط بار: $V_{ce_1}=-R_{ac}ic_1=-(1K\Omega \,||\, 100K\Omega \,||\, R_{i_2})i_{c_1}$

و $R_{i_2}=h_{ie_2}+(1+h_{fe_2})R_{L_2}=0/27+101\times(1K\Omega \,||\, 1K\Omega)=50/77$

$$\Rightarrow V_{ce_1}=-(1K\Omega \,||\, 100K\Omega\, 50/77)i_{c_1}=-0/97i_{c_1}$$

$$\Rightarrow V_{CE_1}-V_{CE_1}Q=-0/97(i_C-I_{C_1Q})$$

به دست آوریم $\Rightarrow V_{CE_1}=17/95V$ و $I_{C_1Q}=1/02$



$$V_{CE_1}(B)\Big|_{i_{C_1}=0} = -0/97(0-I_{C_1Q})+V_{CE_1Q} = +0/97\times 1/02+17/95=18/94V$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه اشباع

$$V_{ce_1}(max)=V_{CE_1Q}-V_{CE}(sat)=17/95-0/2=17/75V$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه قطع

$$V_{ce_1}(max)=V_{CE_1}(A)-V_{CE_1Q}=18/94-17/95=0/99$$

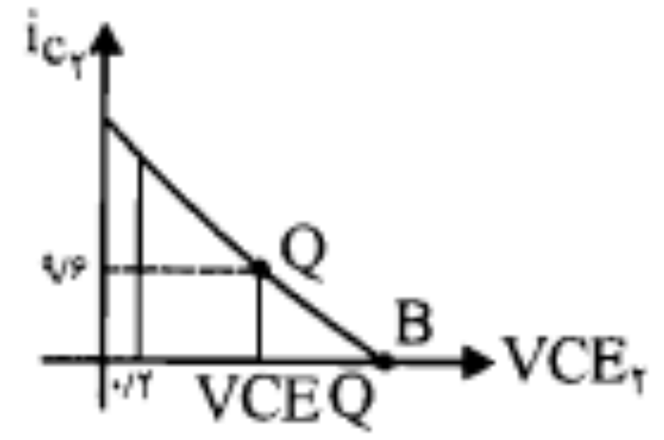
پس کمترین مقدار مورد قبول می‌باشد یعنی حداکثر انحراف برابر است با: $V_{ce_1}(max)=0/99V$

معادله خط بار Q_2 ac

$$V_{ce_2}=-R_{ac}i_{c_2}=-(1K\Omega \,||\, K\Omega)i_{c_2}=-0/5i_{c_2}$$

$$\Rightarrow V_{CE_2}-V_{CE_2Q}=-0/5(i_c-I_{CQ_2})$$

به‌دست آوریم: $\begin{cases} V_{CE_2Q}=10/304V \\ I_{C_2Q}=9/6V \end{cases}$



$$\Rightarrow V_{CE_2}(B)\Big|_{i_{c_2}=0}=0/5\times 9/6+10/304=15/104$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه اشباع:

$$V_{ce_2}(max)=V_{CE_2Q}-V_{CE}(sat)=10/304-0/2=10/104V$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه قطع:

$$V_{ce_2}(max)=V_{CE_2}(B)-V_{CE_2}Q=15/104-10/304=4/8V$$

پس کمترین مقدار قابل قبول می‌باشد یعنی حداکثر انحراف Q_2 برابر است با $V_{ce_2}(max)=4/8V$

حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ ورودی:

$$A_{V_s}=A_V\times\frac{R_i}{R_i+R_s}=-37/86\times\frac{1/99}{1/99+1}=-25/2$$

از طرفی: $A_{V_s}=A_{V_1}\times A_{V_2}$

چون Q_2 کلکتور مشترک می‌باشد پس $A_{V_2}=1$ می‌باشد پس $A_{V_s}=A_{V_1}$

$$\Rightarrow A_{V_1}=-25/2 \Rightarrow \text{از طرفی: } A_{V_1}=\frac{V_{ce_1}}{V_s}=-25/2\Rightarrow$$

$$-25/2=\frac{0/99}{V_s}\Rightarrow V_s=-\frac{0/99}{25/2}=-0/04\,V$$

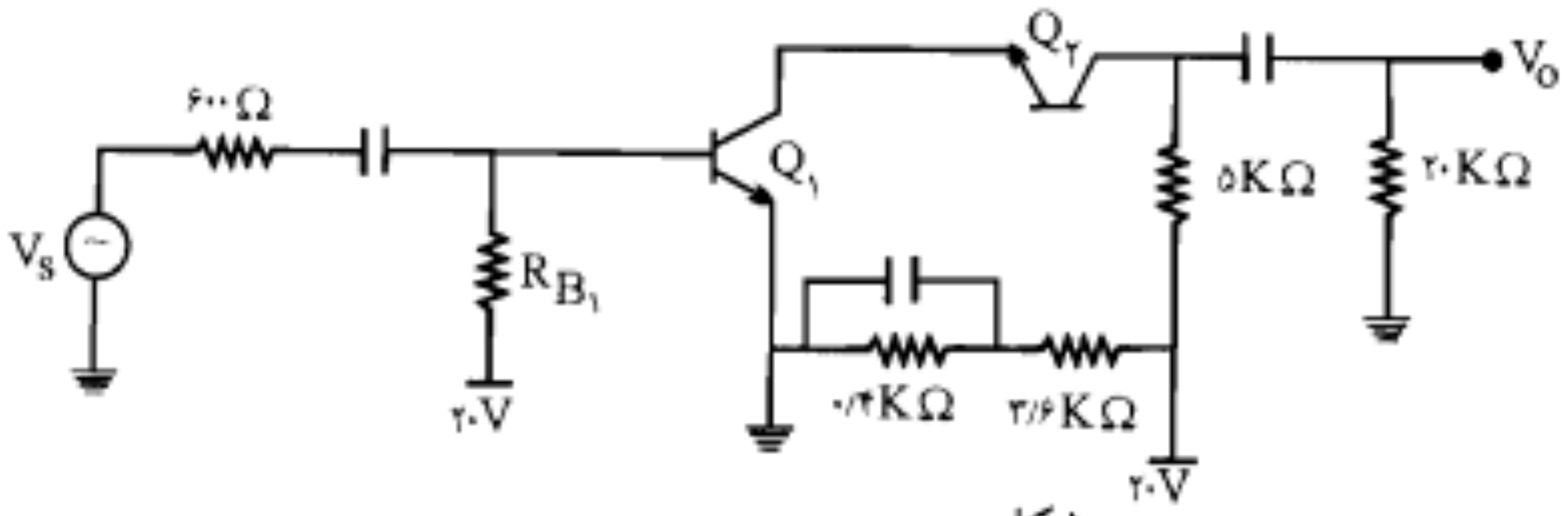
$$\Rightarrow |V_s|=|-0/04|=0/04V=40mv$$

www.PnuEB.com

۴۰ـ در تقویت‌کننده شکل م ـ ۴۰ ترانزیستورها مشابه، $h_{fe}=100$، $V_{CE}(sat)=0/2V$ است.

الف) R_{B_1} را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی Q_2 حداکثر شود.

ب) با فرض $h_{oe}^{-1}=40K\Omega$ و $h_{re}=0$، A_{V_s} را محاسبه کنید؟



شکل م ـ ۴۰

راه حل:

الف)

حلقه R_{B_1} و $20V$ و V_{BE_1}

معادله خط بار dc و ac، Q_2 را می‌یابیم:

$$KVL: R_{B_1}I_{B_1}=20-V_{BE_1}-20-0/7=19/3$$

www.PnuEB.com

$$\Rightarrow I_{B_۱}=\frac{۱۹/۳}{R_{B_۱}} \Rightarrow I_{C_۱}=\frac{۱۹/۳}{R_{B_۱}}\times\beta=\frac{۱۹/۳\times ۱۰۰}{R_{B_۱}}=\frac{۱۹۳۰}{R_{B_۱}}$$

$$Q_۲:\begin{cases} R_{th}=۳/۶\,K\Omega \parallel ۰/۴\,K\Omega=\frac{۳/۶\times ۰/۴}{۳/۶+۰/۴}=۰/۳۶\,K\Omega \\ V_{B_۲}=۲۰\times\frac{۰/۴}{۰/۴+۳/۶}=۲V=V_{th}\end{cases}$$

حلقه: $۲۰\,V,\ ۵K\Omega,\ V_{CB_۲},\ V_{th},\ R_{th}$

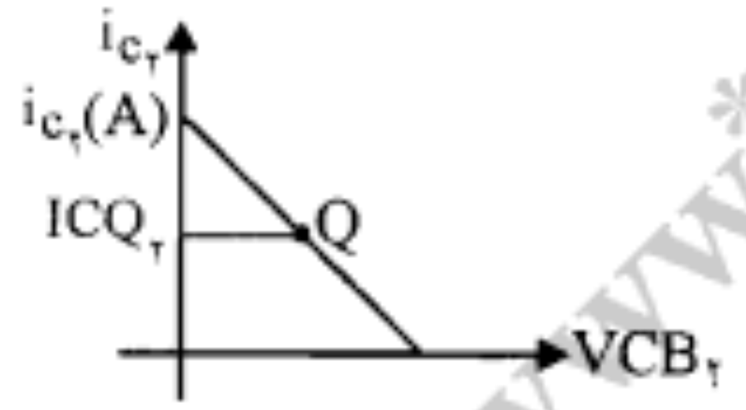
$KVL: V_{CBQ_۲}=۲۰-V_{th}-۵I_{CQ_۲}+R_{th}I_{B_۲} \Rightarrow V_{CBQ_۲}=۲۰-۲-۵I_{CQ_۲}+R_{th}\times\frac{I_{CQ_۲}}{\beta}$

معادله خط بار dc $\Rightarrow V_{CBQ_۲}=۱۸-۵I_{CQ_۲}+۰/۳۶\times\frac{I_{CQ_۲}}{۱۰۰}=۱۸-۵I_{CQ_۲}$

معادله خط بار ac: $V_{cb_۲}=-R_{ac}\,i_{c_۲}=-(۵K\Omega \parallel ۲۰K\Omega)\,i_{c_۲}=-۴\,i_{c_۲}$

$\Rightarrow V_{CB_۲}-V_{CBQ_۲}=-۴(i_{c_۲}-I_{CQ_۲})$

و برای اینکه دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی $Q_۲$ حداکثر شود نقطه کار باید در وسط خط بار ac قرار داشته باشد:



$i_{c_۲}(A)=۲I_{CQ_۲}$

$i_{c_۲}(A)$ شدت جریان نقطه تلاقی خط بار ac با محور $i_{c_۲}$ می‌باشد که با قرار دادن $V_{CB_۲}=۰$ در معادله خط بار ac به دست می‌آید.

$$۰-V_{CBQ_۲}=-۴\,i_{c_۲}(A)+۴I_{CQ_۲} \Rightarrow i_{c_۲}(A)=\frac{V_{CBQ_۲}+۴I_{CQ_۲}}{۴}$$

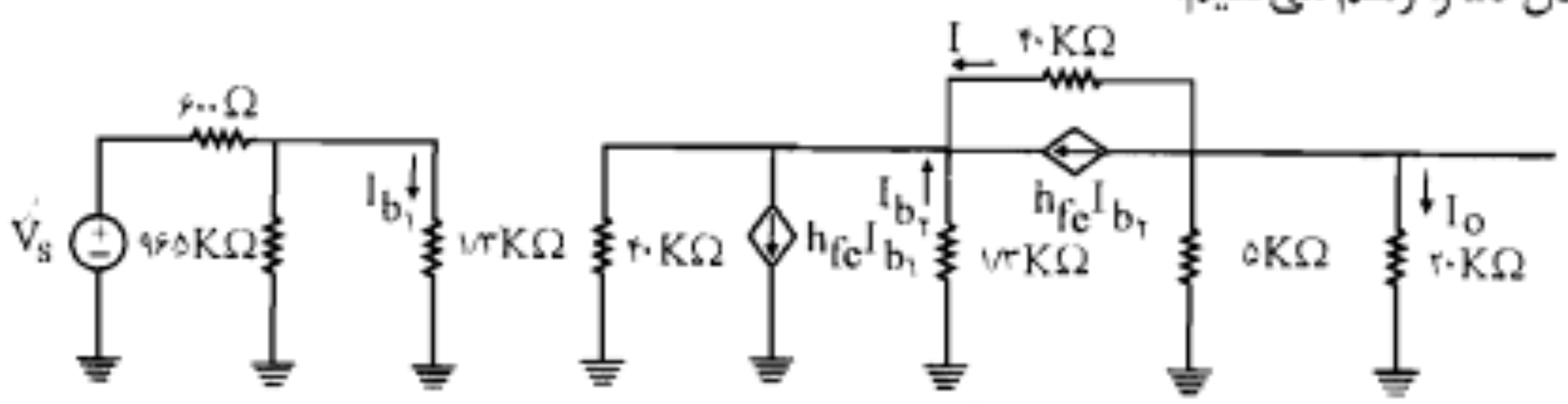
$$\Rightarrow ۲I_{CQ_۲}=\frac{V_{CBQ_۲}+۴I_{CQ_۲}}{۴} \Rightarrow V_{CBQ_۲}=۴I_{CQ_۲}$$

معادله خط بار dc: $V_{CBQ_۲}=۱۸-۵I_{CQ_۲} \Rightarrow ۴I_{CQ_۲}=۱۸-۵I_{CQ_۲} \Rightarrow I_{CQ_۲}=۲mA$

$$\Rightarrow I_{CQ_۱}\cong I_{CQ_۲}=\frac{۱۹۳۰}{R_{B_۱}}=۲mA \Rightarrow R_{B_۱}=\frac{۱۹۳۰}{۲}=۹۶۵\,K\Omega$$

ب) $h_{ie_۱}=h_{ie_۲}=\frac{h_{fe}V_T}{I_C}=\frac{۱۰۰\times ۲۶}{۲}=۱۳۰۰\,\Omega=۱/۳K\Omega$

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



در نقطه A $KCL: I=-I_{b_۲}+h_{fe}I_{b_۱}-h_{fe}I_{b_۲}-\frac{۱/۳I_{b_۲}}{۴۰}=-۱۰۱/۰۳۲۵I_{b_۲}+۱۰۰I_{b_۱}$ (I)

حلقه: $۴۰K\Omega,\ ۱/۳\,K\Omega,\ (۲۰K\Omega \parallel ۵K\Omega)$

$(KVL): ۴۰I-۱/۳I_{b_۲}+(I+۱۰۰I_{b_۲})\times(\frac{۲۰\times ۵}{۲۰+۵})=۰ \Rightarrow ۴۰I-۱/۳I_{b_۲}+۴۰۴I_{b_۲}=۰$

$\Rightarrow ۴۰I=-۳۹۸/۷I_{b_۲} \Rightarrow I=-۹/۰۶I_{b_۲}$

$(I): -۹/۰۶I_{b_۲}=-۱۰۱/۰۳۲۵I_{b_۲}+۱۰۰I_{b_۱} \Rightarrow I_{b_۱}=۰/۹۲I_{b_۲}$

$V_O=-(۲۰K\Omega \parallel ۵K\Omega)\times(I+۱۰۰I_{b_۲})=-۴\times +۹۰/۹۴=-۳۶۳/۷۶I_{b_۲}$

$V_s=۰/۶(I_{b_۱}+I_{۹۶۵K\Omega})+۱/۳I_{b_۱}=۰/۶(I_{b_۱}+\frac{۱/۳I_{b_۱}}{۹۶۵})+۱/۳I_{b_۱}$

$=۰/۶I_{b_۱}+۱/۳I_{b_۱}\cong ۱/۹I_{b_۱}$

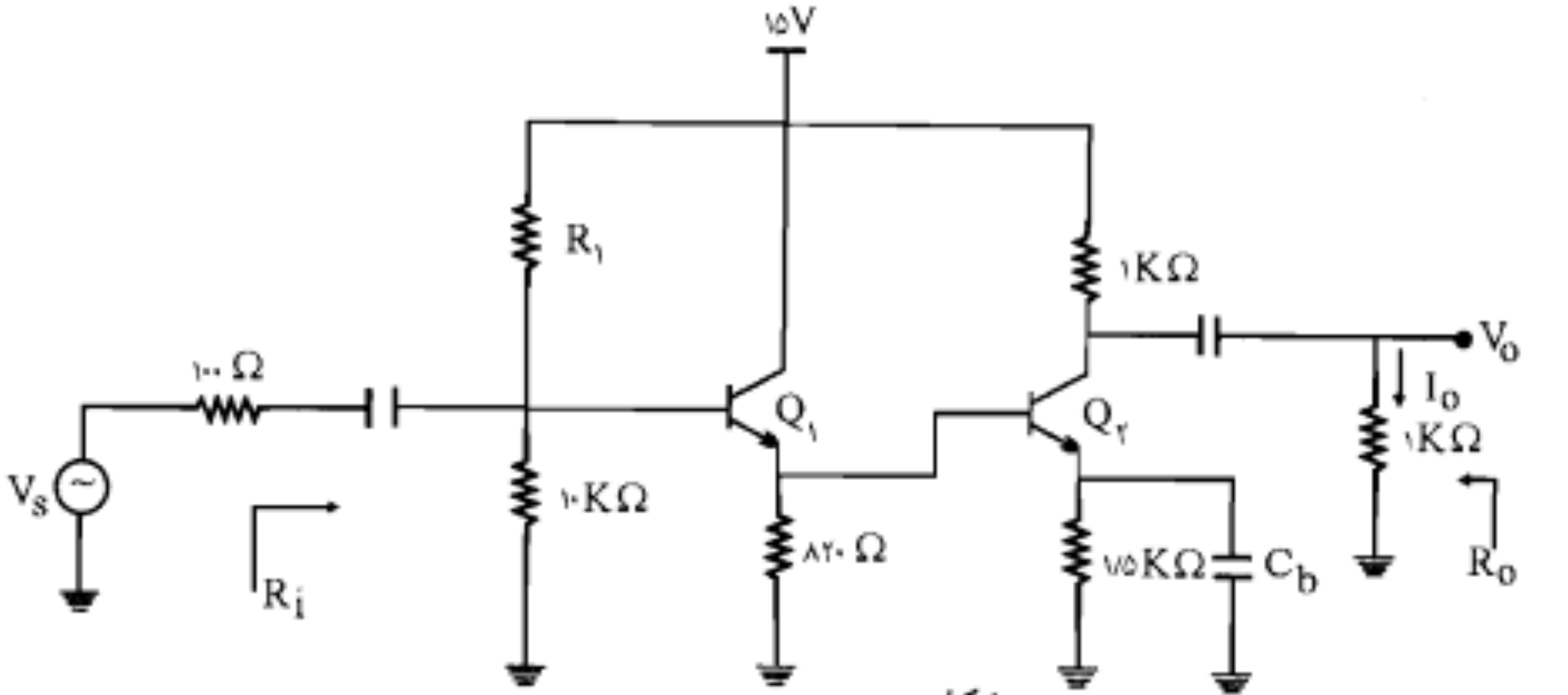
$\Rightarrow V_s=۱/۹\times ۰/۹۲I_{b_۲}=۱/۷۴۸I_{b_۲}$

$$\Rightarrow A_{V_s}=\frac{V_O}{V_s}=\frac{-۳۶۳/۷۶\,I_{b_۲}}{۱/۷۴۸\,I_{b_۲}}=-۲۰۸/۱$$

۴۱ـ در مدار شکل م ـ ۴۱ با فرض $h_{oe}^{-1}=۴۰\,K\Omega$ ، $h_{re}\cong ۰$ ، $h_{fe}=۵۰$ و $V_{CE}(sat)=۰/۲V$.

الف) مقاومت $R_۱$ را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی حداکثر شود.

ب) با فرض $R_۱=۵/۶\,k\Omega$ ، مقادیر کمیت‌های A_V ، A_I ، R_i و R_O را به دست آورید؟

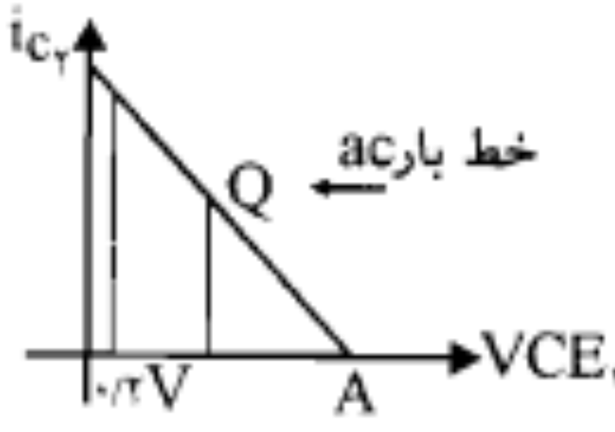


شکل م ـ ۴۱

☑ **راه حل:**

الف) معادله خط بار ac در Q_2:

$$\begin{cases} v_{ce_2} = -R_{ac}\, i_{c_2} = -(1K\Omega \,\|\, 1K\Omega)\, i_{c_2} = -0.5\, i_{c_2} \\ V_{CE_2} - V_{CE_2Q} = -0.5(i_{c_2} - I_{C_2Q}) \end{cases}$$



نقطه A محل تلاقی خط بار ac با محور V_{CE_2} وقتی $i_{c_2} = 0$ است می‌باشد

$$V_{CE_2}(A) = V_{CE_2Q} + 0.5 I_{C_2Q}$$

اگر انحراف متقارن باشد:

$$V_{CE_2Q} = \frac{V_{CE_2}(A) + V_{CE}(sat)}{2}$$

$$\Rightarrow V_{CE_2Q} = \frac{V_{CE_2Q} + 0.5 I_{C_2Q} + 0.2}{2} \Rightarrow V_{CE_2Q} = 0.5 I_{C_2Q} + 0.2 \quad (I)$$

با توجه به شکل مدار: $KVL: V_{CE_2Q} = V_{CC} - 1K\Omega \times I_{C_2Q} = 1.5 I_{E_2Q} \quad (II)$

(I) را در (II) جایگذاری می‌کنیم:

$$(II) \Rightarrow 0.5 I_{C_2Q} + 0.2 = 15 - I_{C_2Q} - 1.5 I_{E_2Q}$$

$$\Rightarrow 14.8 = 1.5 I_{C_2Q} + 1.5 \times \frac{(1+50)}{50}\, I_{C_2Q} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_2Q} = 4.88\ mA \\ I_{E_2} = -\frac{50}{51} \times 4.88 = 4.98\ mA \end{cases}$$

حلقه: 820Ω, V_{BE_2}, $1.5K\Omega$

$$KVL: 0.82(I_{E_1} - I_{B_2}) - 1.5 I_{E_2} = 0.7 \Rightarrow 0.82 I_{E_1} = 1.5 I_{E_2} + 0.82 \frac{I_{C_2}}{\beta} + 0.7$$

$$\Rightarrow 0.82 I_{E_1} = 1.5 \times 4.98 + 0.82 \frac{4.88}{50} + 0.7 = 8.25 \Rightarrow I_{E_1} = 10\ mA$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = \frac{I_{E_1}}{1+\beta} = \frac{10}{51} = 0.197\ mA, \quad I_{C_1} = 50 I_{B_1} = 9.8\ mA$$

$$Q_1: \begin{cases} R_{th} = R_1 \,\|\, 10K\Omega = \frac{10 R_1}{R_1 + 10} \\ V_{th} = 15 \times \frac{10}{10 + R_1} = \frac{150}{10 + R_1} \end{cases}$$

حلقه: $V_{BE_2}, V_{BE_1}, V_{th}, R_{th}, 1.5K\Omega$

$$KVL: R_{th} I_{B_1} + 1.5 I_{E_2} = V_{th} - V_{BE_1} - V_{BE_2} = V_{th} - 1.4$$

$$\Rightarrow \frac{10 R_1}{10 + R_1} \times 0.197 + 1.5 \times 4.98 = V_{th} - 1.4 = 15 \times \frac{10}{10 + R_1} - 1.4$$

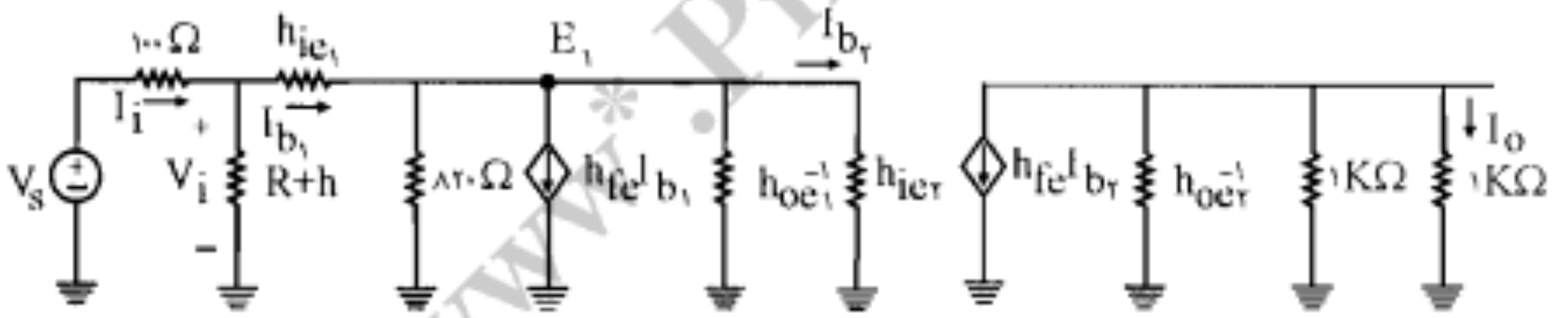
$$\Rightarrow 1.97 R_1 + 74.7 + 7.4 R_1 = 150 - 14 - 1.4 R_1$$

$$\Rightarrow 61.3 = 10.84 R_1 \Rightarrow R_1 = 5.65\ K\Omega$$

ب)

$$\begin{cases} h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{50 \times 26}{9.8} = 133\Omega = 0.133 K\Omega \\ h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{50 \times 26}{4.88} = 266\Omega = 0.266 K\Omega \end{cases} \qquad \begin{cases} R_{th} = \frac{10 \times 5.6}{10 + 5.6} = 3.6\ K\Omega \\ V_{th} = \frac{150}{10 + 5.6} = 9.62\ V \end{cases}$$

مدار معادل ac را با فرض $R_1 = 5.6$ رسم می‌کنیم



$$I_O = -h_{fe} I_{b_2} \times \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{40} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}} = -\frac{2000}{81} I_{b_2}$$

از طرفی: $I_i = I_{b_1} + I_{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{V_i}{3.6} \quad (I)$

گره E_1: $I_{b_2} = (1 + h_{fe}) I_{b_1} \times \frac{\frac{1}{266}}{\frac{1}{40 \times 10^3} + \frac{1}{820} + \frac{1}{266}} = 38.32 I_{b_1}$

$$V_i = h_{ie_1} I_{b_1} + h_{ie_2} I_{b_2} = 0.133 I_{b_1} + 0.266 \times 38.32 I_{b_1} = 10.33 I_{b_1}$$

$$(I): \quad I_i = I_{b_1} + \frac{V_i}{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{10.33 I_{b_1}}{3.6} = 3.87 I_{b_1}$$

www.PnuEB.com

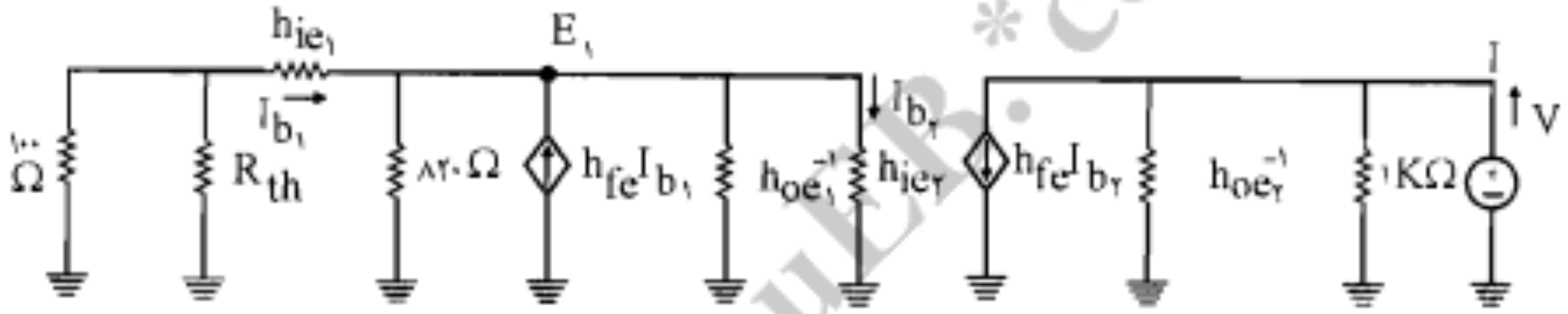
$$\Rightarrow R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۱۰/۳۳۱ I_{b_۱}}{۳/۸۷ I_{b_۱}} = ۲/۶۷ K\Omega$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-\frac{۲۰۰}{۸۱} \times ۳۸/۳۲ I_{b_۱}}{۳/۸۷ I_{b_۱}} = -۲۴۴/۵$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۲۴۴/۵ \times \frac{۱ K\Omega}{۲/۶۷} = -۹۱/۶$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۹۱/۶ \times \frac{۲/۶۷}{۲/۶۷ + ۰/۱} = -۸۸/۳$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ V_s را بی‌اثر می‌کنیم.



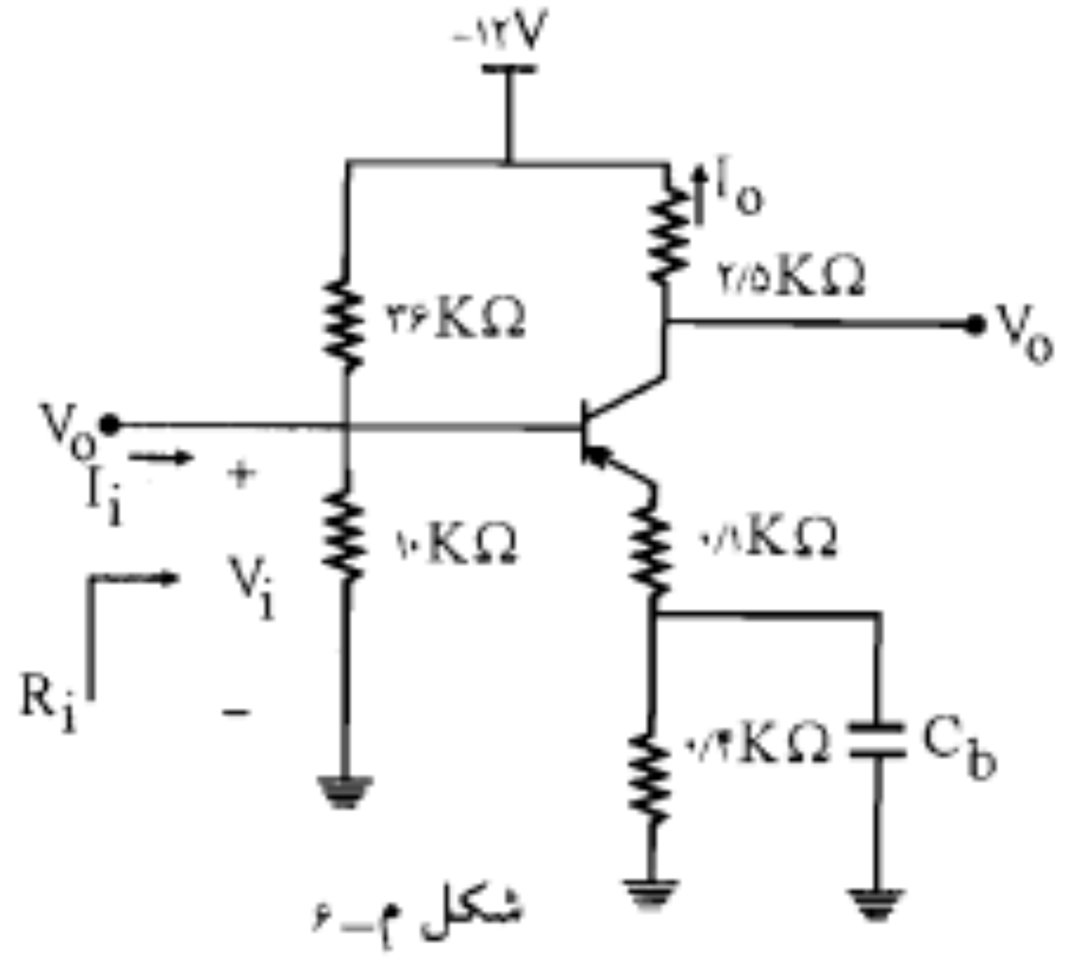
$R_O = \frac{V}{I}$ و $I = h_{fe} I_{b_۲} + \frac{V}{۴۰} + \frac{V}{۱} + \frac{V}{۱} = ۵۰ I_{b_۲} + \frac{V}{۴۰} + ۲V$

$Ib_۲ = ۰$ چون مدار سمت چپ منبع مستقل نداشته و نیز منبع وابسته به سمت راست ندارد.

$$\Rightarrow I = ۵۰ \times ۰ + \frac{V}{۴۰} + ۲V = V\left(\frac{۱}{۴۰} + ۲\right) \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{\frac{۱}{۴۰} + ۲} = \frac{۴۰}{۱ + ۸۰}$$

$$\Rightarrow R_O = ۰/۴۹۴ K\Omega$$

۴۲ـ مسائل ۶ و ۷ را با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید؟



شکل م-۶

☑ **راه حل:**

$R_i \ , \ A_I \ , \ A_V = ?$

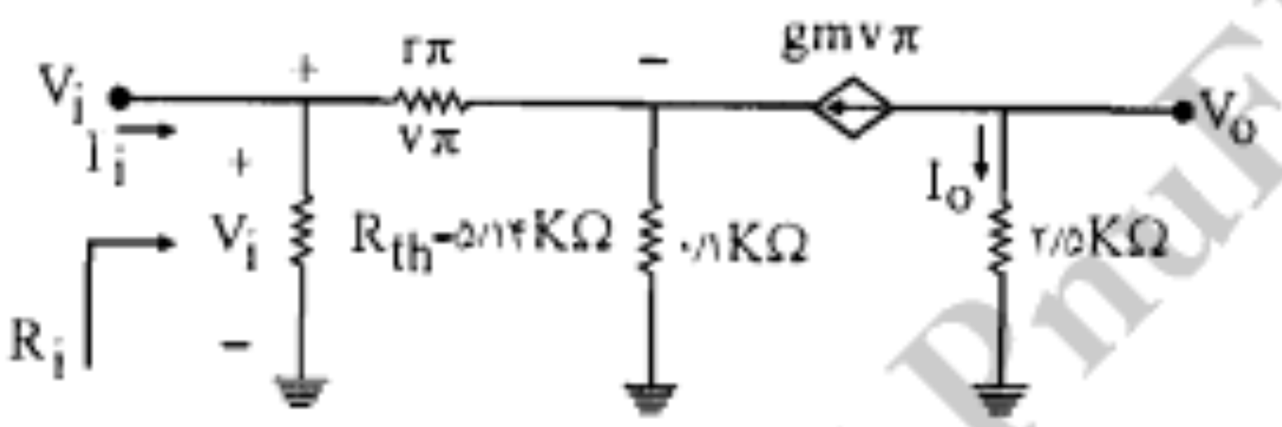
$$\begin{cases} h_{fe} = ۱۰۰ \\ h_{re} = h_{oe} = ۰ \end{cases}$$

در مسئله ۶، IC را به دست آوردیم:

$I_{CQ} = ۱/۸ mA$

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{۱/۸}{۲۶} = ۶۹/۲ \frac{mA}{V} \\ r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{۱۰۰}{۶۹/۲} = ۱/۴۴ K\Omega \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌شود:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-g_m V_\pi}{I_{R_{th}} + I_{r\pi}} = \frac{-۶۹/۲ V_\pi}{\frac{V_\pi}{۱/۴۴} + \frac{V_\pi + ۰/۱(۶۹/۲ V_\pi + \frac{V_\pi}{۱/۴۴})}{۵/۱۴}} \Rightarrow$$

$$A_I = \frac{-۶۹/۲ V_\pi}{۰/۶۹۴ V_\pi + \frac{۷/۹۹}{۵/۱۴} V_\pi} = -۳۰/۸$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V\pi + ۰/۱(g_m V\pi + \frac{V\pi}{V\pi})}{I_i}$$

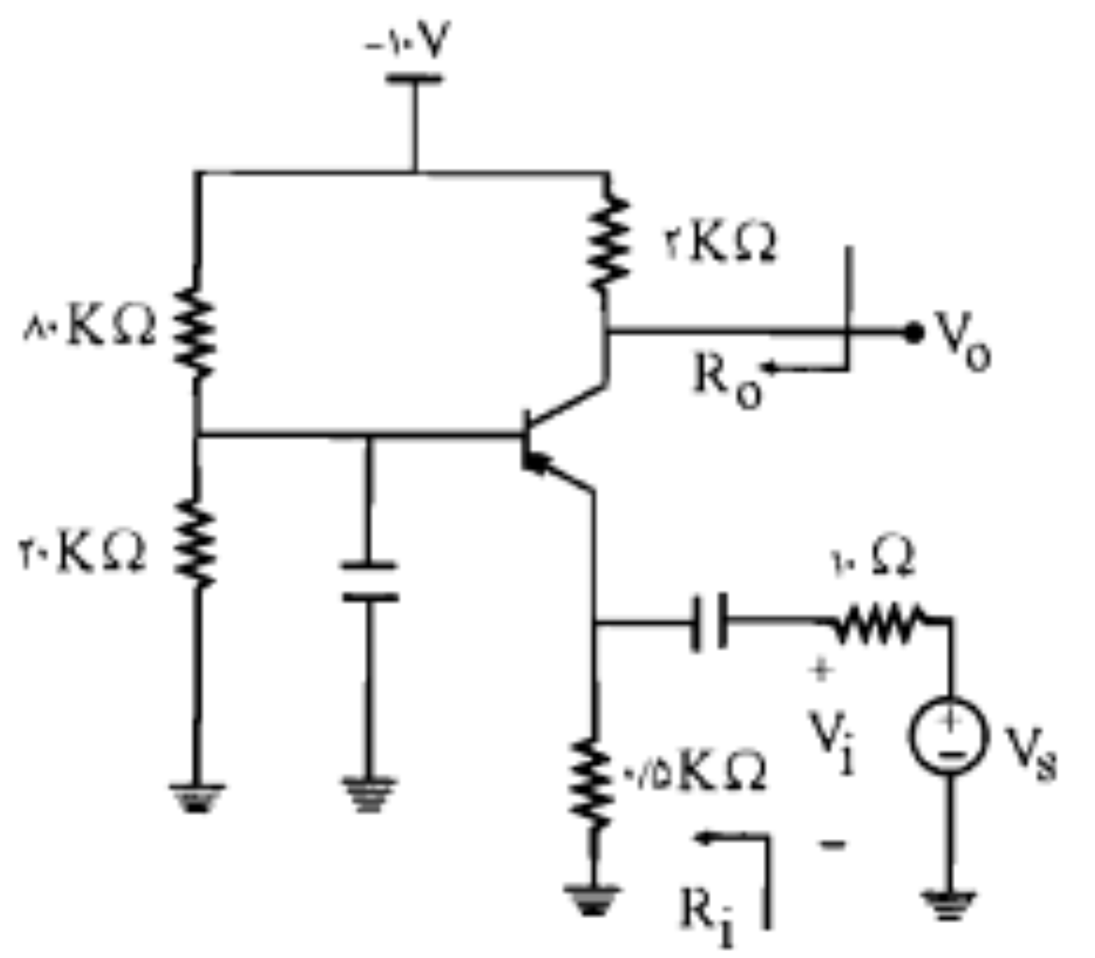
$$\Rightarrow R_i = \frac{V_\pi + ۰/۱(۶۹/۲ V\pi + \frac{V\pi}{۱/۴۴})}{۲/۲۵ V\pi} = \frac{۷/۹۹ V\pi}{۲/۲۵ V\pi} = ۳/۵۵ K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۳۰/۸ \times \frac{۲/۵}{۳/۵۵} = -۲۱/۷$$

مسئله (۷)

$h_{fe} = ۱۰۰$ $\quad$ $A_V, A_{V_S}, R_i, A_I, R_O = ?$

www.*PnuEB*.com

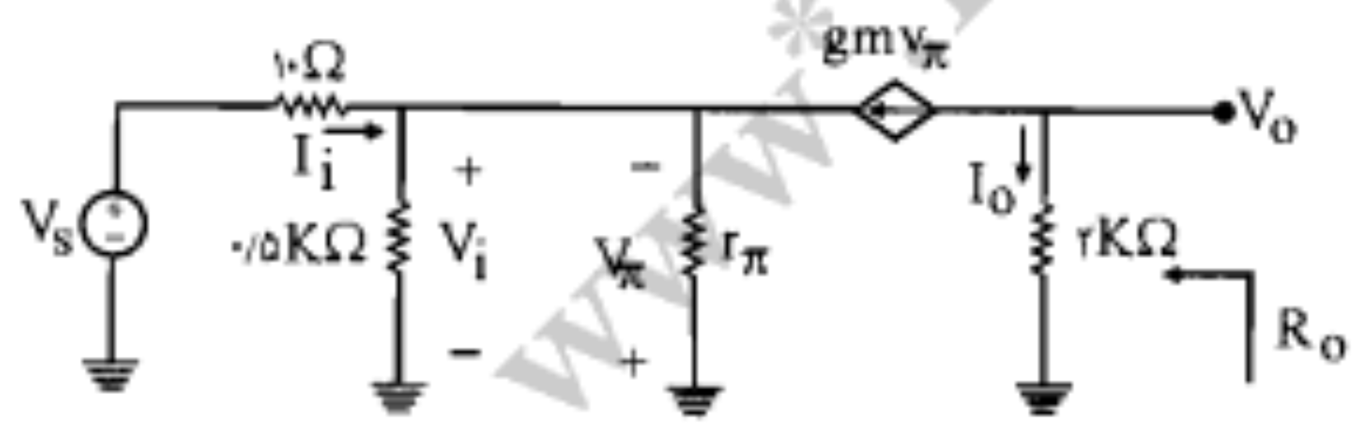


در مسئله (۷)، I_{CQ} را به دست آوردیم: $I_{CQ} = ۱/۹۵mA$

$$\begin{cases} R_{th} = \dfrac{۲۰ \times ۸۰}{۲۰ + ۸۰} = ۱۶ \\ V_{th} = -۱۰ \times \dfrac{۲۰}{۲۰ + ۸۰} = -۲V \end{cases}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{۱/۹۵}{۲۶} = ۷۵\frac{mA}{V} \quad , \quad r\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{۱۰۰}{۷۵} = ۱/۳۳K\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر در می‌آید:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-g_m V\pi}{\frac{V_i}{۰/۵} - \frac{V\pi}{r\pi} - g_m V\pi} = \frac{-۷۵ V\pi}{\frac{-V\pi}{۰/۵} - \frac{V\pi}{۱/۳۳} - ۷۵ V\pi} = \frac{۷۵}{\frac{۱}{۰/۵} + \frac{۱}{۱/۳۳} + ۷۵} = ۰/۹۶$$

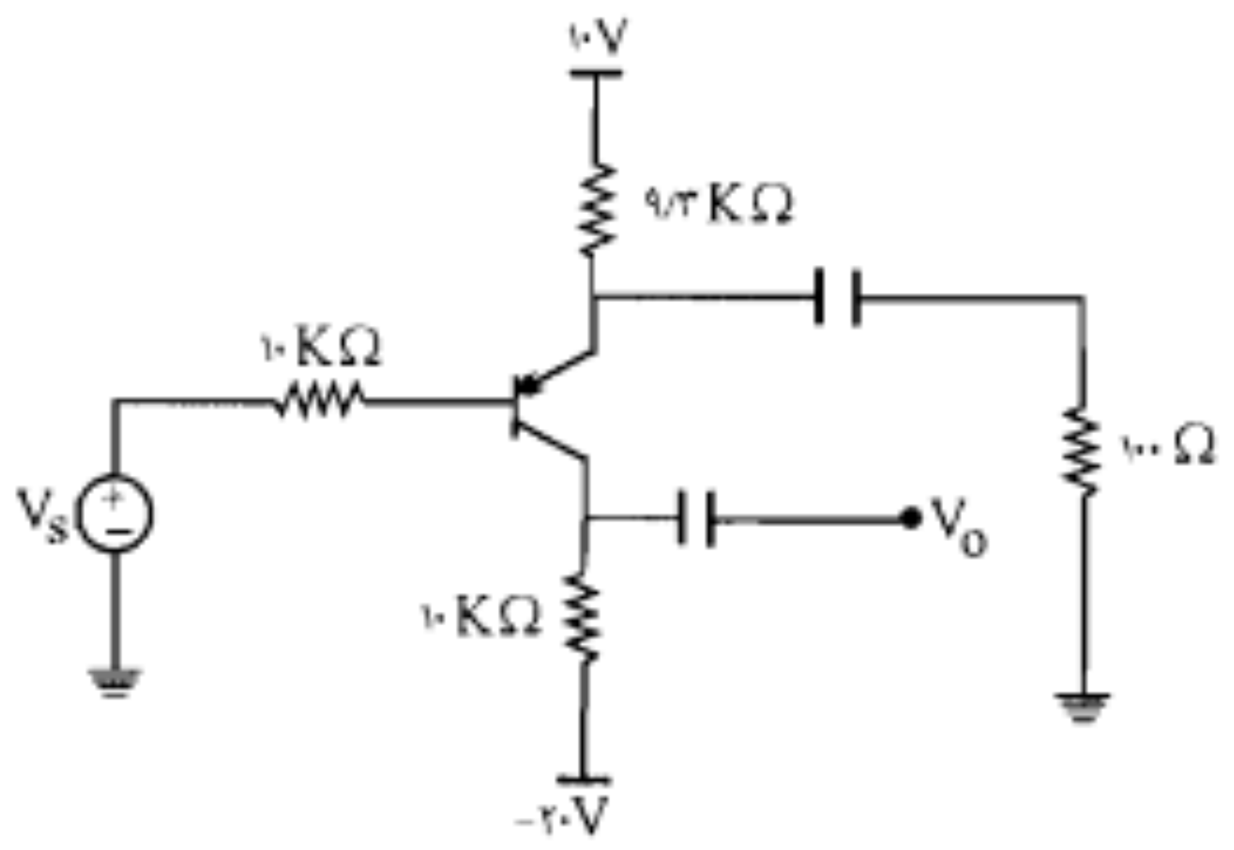
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-V\pi}{\frac{-V\pi}{۰/۵} - \frac{V\pi}{r\pi} - g_m V\pi} = \frac{+۱}{\frac{۱}{۰/۵} + \frac{۱}{۱/۳۳} + ۷۵} = ۱۳\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۰/۹۶ \times \frac{۲}{۰/۰۱۳} = ۱۴۷/۷$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = ۱۴۷/۷ \times \frac{۱۳}{۱۳ + ۱۰} = ۸۳/۵$$

$$R_O = R_L = ۲K\Omega$$

۴۳ـ مسأله ۱۹ را با فرض $V_A = ۱۰۰$ و با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید؟



$h_{fe} = ۱۰۰ \qquad A_{V_s} = ?$

☑ راه حل:

در مسئله ۱۹، I_{CQ} را به دست آوردیم:

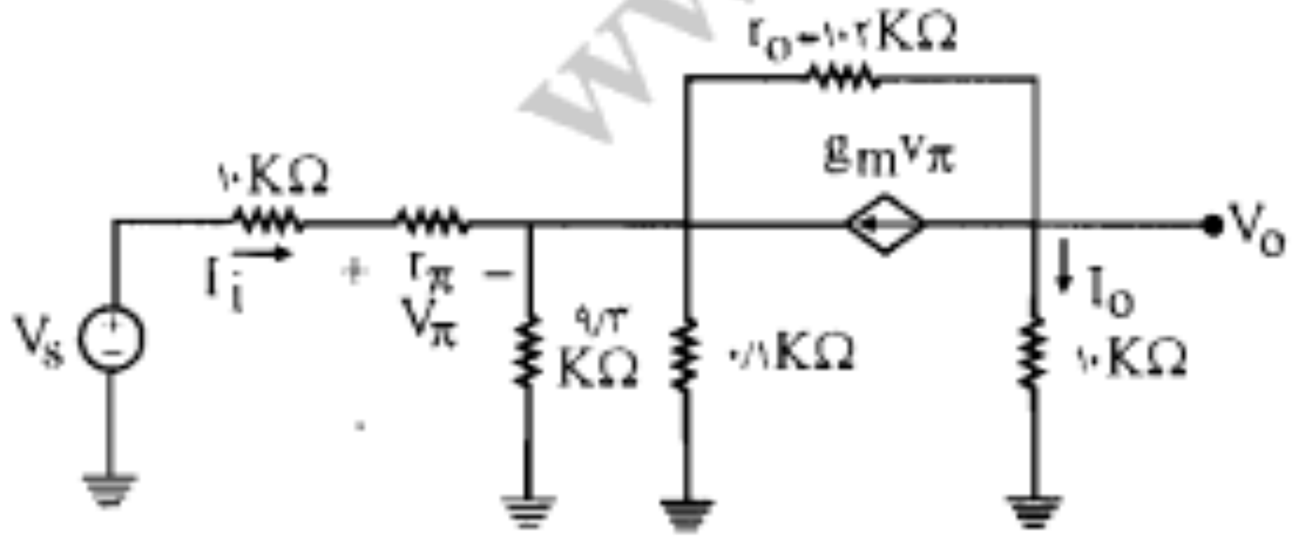
$$I_{CQ} = ۰/۹۸mA$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{۰/۹۸}{۲۶} = ۳/۷۷ \times ۱۰^{-۲}\ \frac{A}{V}$$

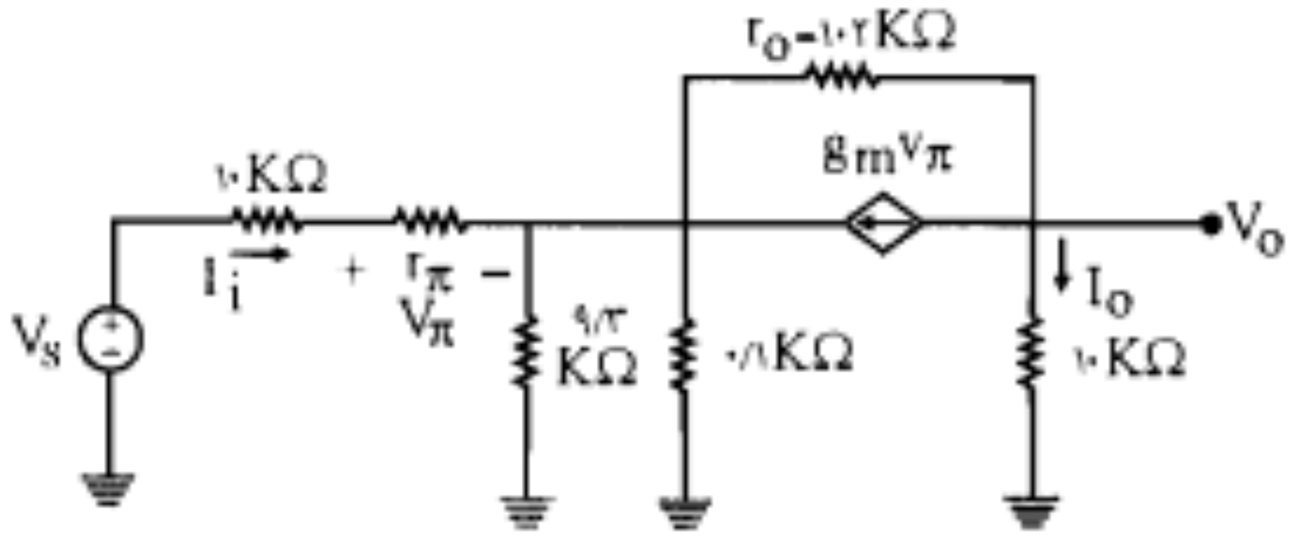
$$r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{۱۰۰\Omega}{۳/۷۷ \times ۱۰^{-۲}} = ۲۶۵۲\Omega = ۲/۶۵۲K\Omega$$

$$r_O = \frac{V_A}{I_C} = \frac{۱۰۰}{۰/۹۸} = ۱۰۲K\Omega$$ رابطه (۶ـ۹۹)

مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



با تبدیل منبع جریان $g_m V\pi$ به منبع ولتاژ داریم:



www.*PnuEB.*com

$V_\pi = r_\pi \times I_i = ۲/۶۵۲ I_i$

$A_I = \frac{I_O}{I_i}$

حلقه: ۱۰KΩ , ۰/۰۹۸۹KΩ , r_O , $g_m V_\pi r_O$

KVL: $۰/۰۹۸(I_i - I_O) - (۱۰۲ + ۱۰) I_O = g_m V_\pi \times r_O$

$۰/۰۹۸۹ (I_i - I_O) - ۱۱۲ I_O = ۳/۷۷ \times ۱۰^{-۲} \times ۱۰۲ \times ۲/۶۵۲ I_i \times ۱۰^{۳}$

$۰/۰۹۸۹ I_i - ۰/۰۹۸۹ I_O - ۱۱۲ I_O = ۱۰/۲ \times ۱۰^{۳} I_i$

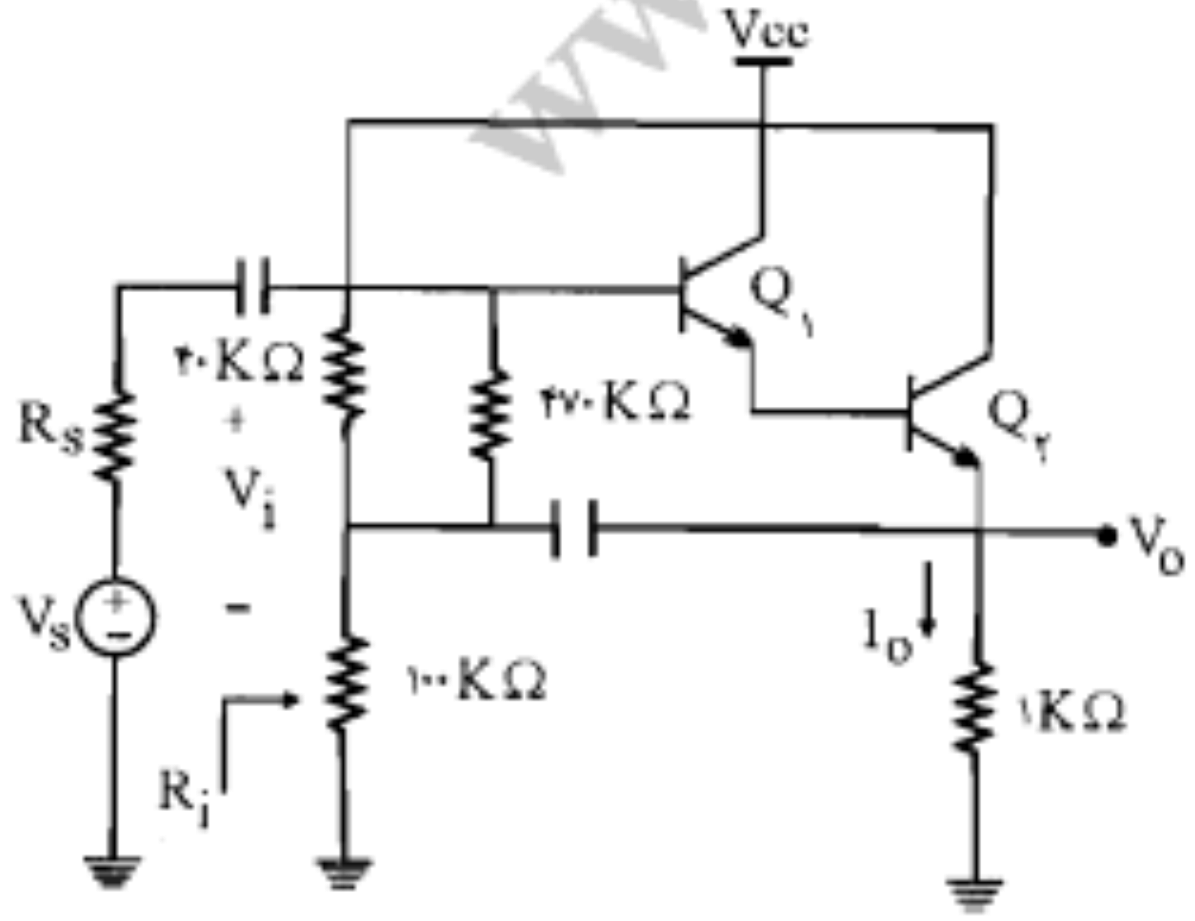
$\Rightarrow ۱۰/۲ \times ۱۰^{۳} I_i = = ۱۱۲/۰۹۸۹ I_O \Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = -۹۱$

$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۰/۰۹۸۹ (I_i - I_O)}{I_i} = ۰/۰۹۸۹ - ۰/۰۹۸۹ A_I = ۰/۰۹۸۹ - ۰/۰۹۸۹ \times (-۹۱)$
$= ۹/۰۹۹ \ KΩ$

$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -۹۱ \times \frac{۱۰KΩ}{۹/۰۹۹KΩ} = -۱۰۰$

$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -۱۰۰ \times \frac{۹/۰۹۹}{۹/۰۹۹ + ۱۰} = -۴۷/۶$

۴۴ـ مسأله ۳۲ را با فرض $I_{C_1} = I_{C_2} = ۷/۵mA$ و $\beta = ۲۰۰$ و با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.



$h_{oe}^{-1} = ۴۰ KΩ$

$h_{ie} = ۱KΩ$

$h_{fe} = ۲۰۰$

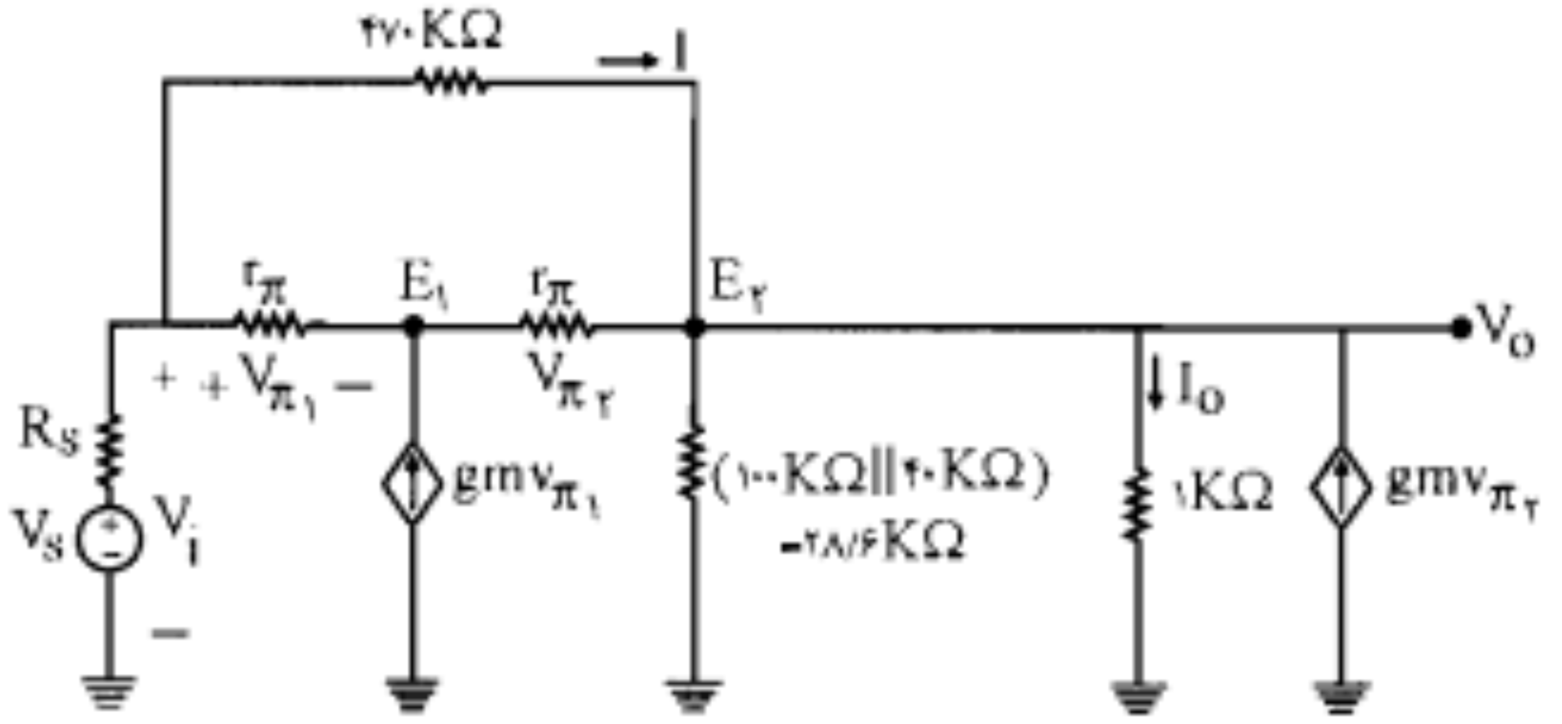
A_I , A_V , R_i , R_O

☑ **راه حل:**

$I_{C_1} = I_{C_2} \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_2} = g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{۷/۵mA}{۲۶} = ۲۸۸/۵ \frac{mA}{V}$

$r_{\pi_1} = r_{\pi_2} = r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{۲۰۰}{۲۸۸/۵} = ۰/۶۹ \ KΩ$

مدار معادل را رسم می‌کنیم:



با استفاده از تقسیم جریان

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} \Rightarrow \begin{cases} (I + g_m V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{r_\pi}) \times \frac{۲۸/۶}{۲۸/۶ + ۱} = I_O \\ I + \frac{V_{\pi_1}}{r_\pi} = I_i \end{cases} \quad (I)$$

حلقه: $V_{\pi_1}, V_{\pi_2}, ۴۷۰ KΩ \Rightarrow KVL: V_{\pi_1} + V_{\pi_2} = ۴۷۰ I \quad (II)$

(گره E_1) KCL: $\frac{V_{\pi_1}}{r_\pi} + g_m V_{\pi_1} = \frac{V_{\pi_2}}{r_\pi} \Rightarrow \frac{V_{\pi_1}}{۰/۶۹} + ۲۸۸/۵ V_{\pi_1} = \frac{V_{\pi_2}}{۰/۶۹}$

$\Rightarrow V_{\pi_2} = ۲۰۰/۱ V_{\pi_1} \quad (III)$

با جایگذاری (III) در رابطه (II) داریم:

$V_{\pi_1} + ۲۰۰/۱ V_{\pi_1} = ۴۷۰ I \Rightarrow I = \frac{۲۰۱/۱}{۴۷۰} V_{\pi_1} = ۰/۴۳ V_{\pi_1}$

این رابطه به دست آمده را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$(I): A_I = \frac{(I + ۲۸۸/۵ V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{۰/۶۹}) \times \frac{۲۸/۶}{۲۸/۶ + ۱}}{(I + \frac{V_{\pi_1}}{۰/۶۹})}$$

$$A_I = \frac{(۰/۴۳ V_{\pi_1} + ۲۸۸/۵ \times ۲۰۰/۱ V_{\pi_1} + \frac{۲۰۰/۱}{۰/۶۹} V_{\pi_1}) \times ۰/۹۷}{(۰/۴۳۷ V_{\pi_1} + \frac{V_{\pi_1}}{۰/۶۹}) = ۱/۸۸ V_{\pi_1}}$$

$\Rightarrow A_I = ۲۹۹۴۷$

$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۴۷۰ I + ۱ \times I_O}{I_i} = ۴۷۰ \frac{I}{I_i} + A_I = ۴۷۰ \times \frac{۰/۴۳ V_{\pi_1}}{۱/۸۸ V_{\pi_1}} = ۲۹۹۴۷ + ۱۰۷/۵ =$

www.PnuEB.com

$$= ۳۰۰۵۴/۵K\Omega \simeq ۳M\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = ۲۹۹۴۷\times\frac{۱}{۳۰۰۵۴/۵} = ۰/۹۹۶$$

برای محاسبه R_O منبع ورودی را صفر می‌کنیم و یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم:

$$R_O=\frac{V}{I}$$

$$I=\frac{V}{۱K\Omega}+\frac{V}{۲۸/۶\ K\Omega} - ۲۸۸/۵V_{\pi_۲} - I_{۴۷۰K\Omega} - \frac{V_{\pi_۲}}{r_\pi}$$

قبلاً به دست آورده بودیم: $I=۰/۴۳۷\,V\pi_۱$ و $V\pi_۲ = ۲۰۰/۱\, V\pi_۱$ با جایگذاری این روابط در رابطه بالا داریم:

$$I = ۱/۰۳۵V - ۲۸۸/۵\times ۲۰۰/۱V_{\pi_۱} - ۰/۴۳V_{\pi_۱} - \frac{۲۰۰/۱V_{\pi_۱}}{۰/۶۹}$$

$$\Rightarrow I = ۱/۰۳۵V - ۵۸۰۱۹/۳V\pi_۱ \quad (A)$$

حلقه: $V_{\pi_۱}\ ,\ V_{\pi_۲}\ , R_s\ , V$

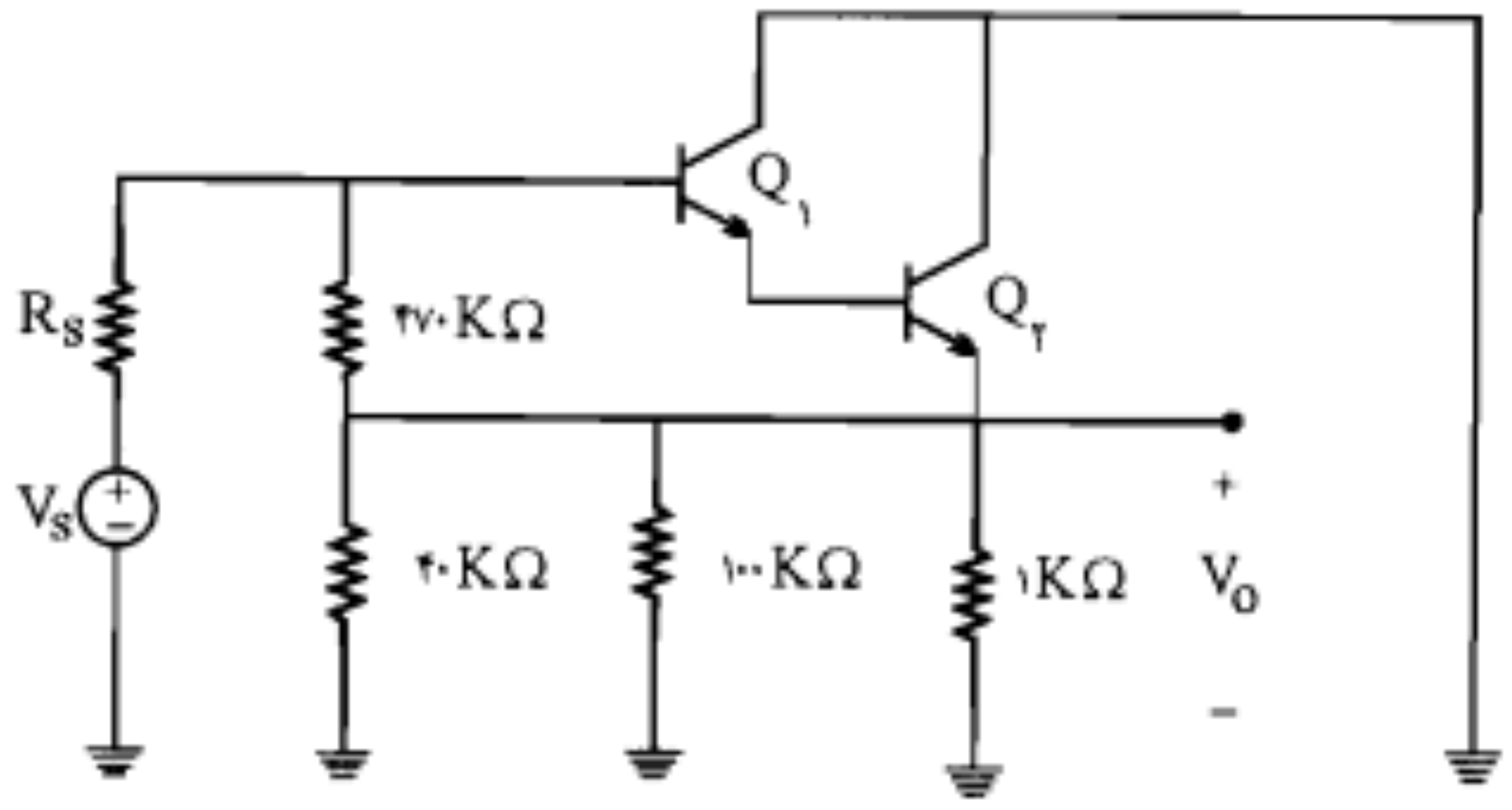
$$KVL: V = -V_{\pi_۱} - V_{\pi_۲} - R_s\left(I+\frac{V_{\pi_۱}}{۰/۶۹}\right) = -V_{\pi_۱} - ۲۰۰/۱V_{\pi_۱} - R_s\left(۰/۴۳۷V_{\pi_۱}+\frac{V_{\pi_۱}}{۰/۶۹}\right)$$

$$\Rightarrow V = -V_{\pi_۱}(۲۰۱/۱+۱/۸۸R_s) \Rightarrow V_{\pi_۱} = \frac{-V}{۲۰۱/۱+۱/۸۸R_s}$$

$$\overset{(A)}{\Rightarrow} I = ۱/۰۳۵V - ۵۸۰۱۹/۳\times\frac{-V}{۲۰۱/۱+۱/۸۸R_s}$$

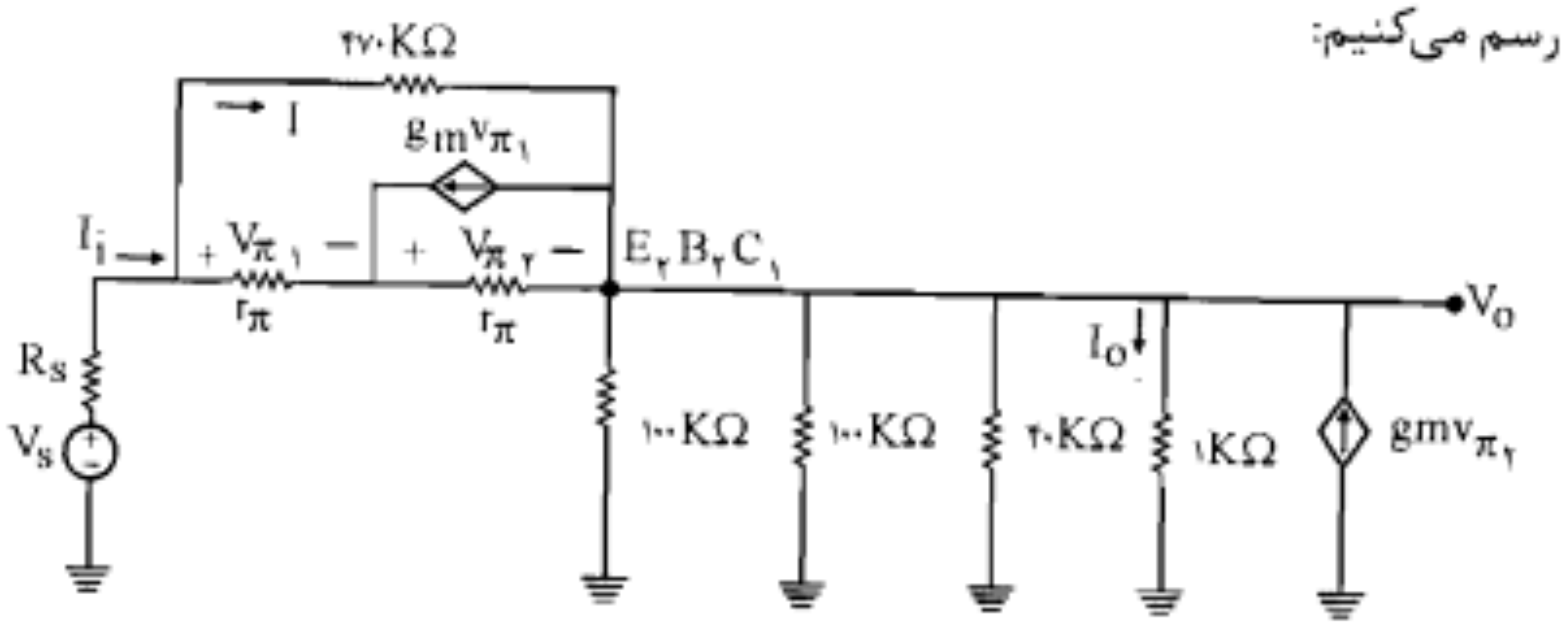
$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۲۰۱/۱+۱/۸۸R_s}{۵۸۲۲۹/۳+۱/۹۴R_s}$$

مدار دوم:



$$g_m = ۲۸۸/۵ \quad , \quad r_\pi = ۰/۶۹\ K\Omega$$

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



با استفاده از تقسیم جریان:

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} \Rightarrow \begin{cases} I_O = \left(۲۸۸/۵V_{\pi_۲} - ۲۸۸/۵V_{\pi_۱} + I + \frac{V\pi_۲}{r\pi}\right)\times\frac{۱۰۰K\Omega\,\|\,۱۰۰K\Omega\,\|\,۴۰K\Omega}{(۱۰۰K\Omega\,\|\,۱۰۰K\Omega\,\|\,۴۰K\Omega)+۱} \\ I_i = I + \frac{V_{\pi_۱}}{r_\pi}\end{cases}$$

حلقه: $V_{\pi_۱}, V_{\pi_۲}, ۴۷۰K\Omega$ KVL: $۴۷۰I = V_{\pi_۱}+V_{\pi_۲}$ (I)

(گره $E_۱$) KCL: $\frac{V_{\pi_۱}}{r_\pi} + ۲۸۸/۵V_{\pi_۱} = \frac{V_{\pi_۲}}{r_\pi} \Rightarrow V_{\pi_۲} = ۲۰۰/۱V_{\pi_۱}$ (II)

با جایگذاری رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$۴۷۰I = V_{\pi_۱}+۲۰۰/۱V_{\pi_۱} = ۲۰۱V_{\pi_۱} \Rightarrow I = ۰/۴۳V_{\pi_۱}$$

با جایگذاری در رابطه I_O داریم:

$$I_O = \left(۲۸۸/۵\times۱۰۰/۱V_{\pi_۱} - ۲۸۸/۵V_{\pi_۱}+۰/۴۳V_{\pi_۱}+\frac{۲۰۰/۱V_{\pi_۱}}{۰/۶۹}\right)\times\frac{۲۲/۲۲}{۲۲/۲۲+۱}$$

$$\Rightarrow I_O = ۵۵۲۴۴/۵V_{\pi_۱}$$

$$I_i = ۰/۴۳V_{\pi_۱}+\frac{V_{\pi_۱}}{۰/۶۹} = ۱/۸۸V_{\pi_۱}$$

$$\Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{۵۵۲۴۴/۵V_{\pi_۱}}{۱/۸۸V_{\pi_۱}} = ۲۹۳۸۵/۴$$

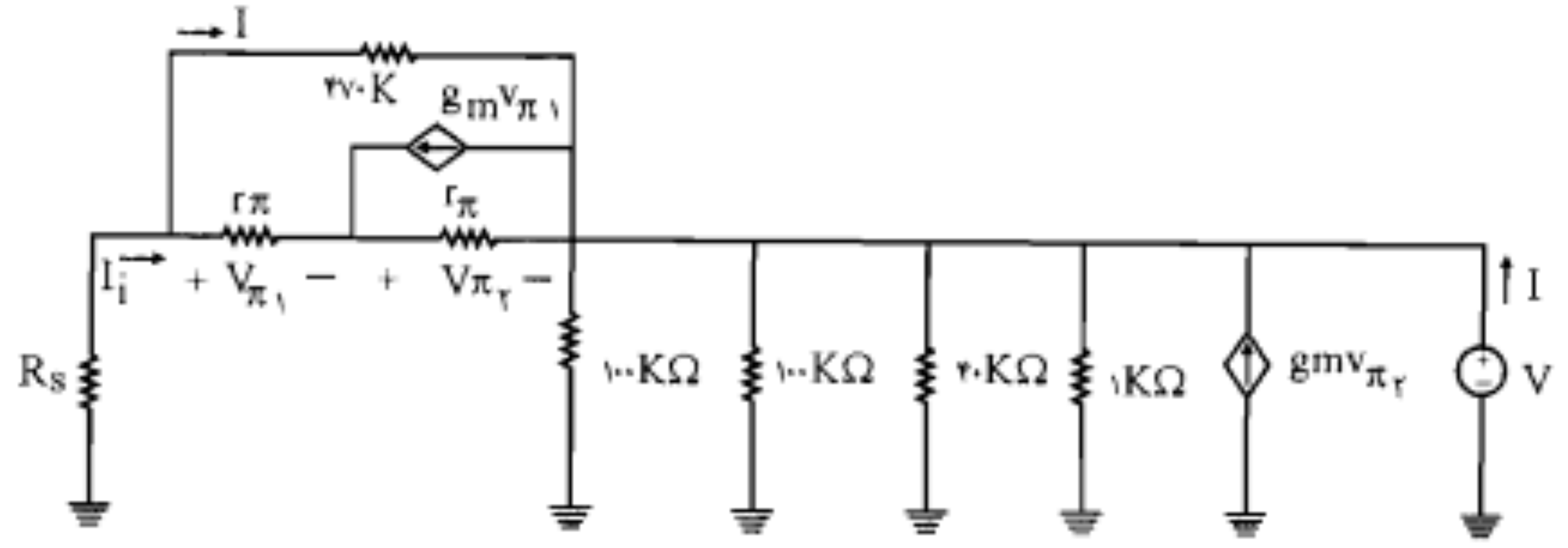
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{۴۷۰I+۱\times I_o}{I_i} = ۴۷۰\frac{I}{I_i}+A_I = ۴۷۰\times\frac{۰/۴۳V_{\pi_۱}}{۱/۸۸V_{\pi_۱}}+۲۹۳۸۵/۴$$

$$\Rightarrow R_i = ۲۹۴۹۲/۹\ K\Omega$$

$$A_V = A_I\times\frac{R_L}{R_i} = ۲۹۳۸۵/۴\times\frac{۱}{۲۹۴۹۲/۹} = ۰/۹۹۶$$

www.PnuEB.com

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ورودی را بی‌اثر می‌کنیم.



$$R_O = \frac{V}{I} \quad , \quad I = \frac{V}{۱} + \frac{V}{۴۰} + \frac{V}{۱۰۰} + \frac{V}{۱۰۰} - g_m V_{\pi_۲} + g_m V_{\pi_۱} - I_{۴۷۰K\Omega} - \frac{V_{\pi_۲}}{r_\pi}$$

$$\Rightarrow I = ۱/۰۴۵ V - ۲۸۸/۵ \times ۲۰۰/۱ V_{\pi_۱} + ۲۸۸/۵ V_{\pi_۱} - ۰/۴۳ V_{\pi_۱} - ۱/۴۵ \times ۲۰۰/۱ \times V_{\pi_۱}$$

$$\Rightarrow I = ۱/۰۴۵ - ۵۷۷۳۱ V_{\pi_۱}$$

حلقه: V , ۴۷۰K۵۰ , R_s

$$V = -۴۷۰ I - R_s \left(I_{۴۷۰} + \frac{V_{\pi_۱}}{r_\pi}\right) = -۴۷۰ \times ۰/۴۳ V_{\pi_۱} - R_s \left(۰/۴۳ V_{\pi_۱} + \frac{۱}{۰/۶۹} V_{\pi_۱}\right)$$

$$\Rightarrow V = -(۲۰۲/۱ + ۱/۸۸ R_s) V_{\pi_۱}$$

$$\Rightarrow V_{\pi_۱} = -\frac{V}{۲۰۲/۱ + ۱/۸۸ R_s}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{V}{۱/۰۴۵ V - ۵۷۷۳ V\pi_۱} = \frac{V}{۱/۰۴۵ V - ۵۷۷۳۱ \times \frac{-V}{۲۰۲/۱ + ۱/۸۸ R_s}}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{۲۰۲/۱ + ۱/۸۸ R_s}{۵۷۹۴۲/۲ + ۱/۹۶ R_s}$$

فصل ۷
ترانزیستورهای اثر میدان

www.PnuEB.com

۱ـ برای یک JFET با $I_{DSS} = ۱۰ mA$ و $V_P = -۲V$ که به آن یک V_{DS} کوچک اعمال شده است. مقدار r_{DS} را به ازای مقادیر $V_{GS} = ۰$ و $V_{GS} = -۱$ ولت را به دست آورید.

طبق رابطه (۷ ـ ۳) کتاب داریم:

☑ **راه حل:**

$$r_{DS} = \left[\frac{۲ I_{D_{SS}}}{V_P}\left(\frac{V_{GS}}{V_P} - ۱\right)\right]^{-۱}$$

$$V_{GS} = ۰ \Rightarrow r_{DS} = \left[\frac{۲ \times ۱۰}{-۲}\left(\frac{۰}{-۲}\right) - ۱\right]^{-۱} = \frac{۱}{۱۰} K\Omega \Rightarrow r_{DS} = ۱۰۰ \Omega$$

$$V_{GS} = -۱V \Rightarrow r_{DS} = \left[\frac{۲ \times ۱۰}{-۲}\left(\frac{-۱}{-۲} - ۱\right)\right]^{-۱} = \frac{۱}{۵} K\Omega \Rightarrow r_{DS} = ۲۰۰ \Omega$$

۲ـ یک JFET را با $I_{DSS} = ۱۰ mA$ و $V_P = -۲V$ در نظر بگیرید. به ازای $V_{GS} = -۱/۵V$ حداقل مقدار V_{DS} که به ازای آن JFET در ناحیه اشباع کار می‌کند چقدر است؟

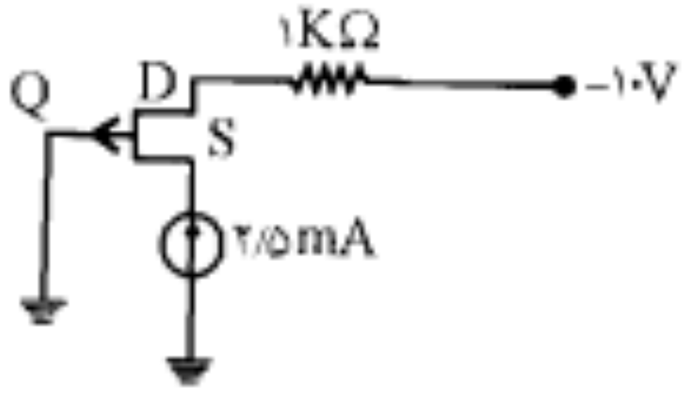
☑ **راه حل:**

در ناحیه اشباع: $V_{GD} \le -|V_P| \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le -|V_P|$

$$\Rightarrow -۱/۵ - V_{DS} \le -۲ \Rightarrow V_{DS} \ge ۰/۵$$

پس حداقل مقدار V_{DS} برابر $۰/۵V$ می‌باشد.

۳ ـ یک JFET کانال P با $I_{DSS} = 10\ mA$ و $V_P = -3V$ باگیت زمین شده در حال کار است. درین با یک مقاومت ۱KΩ به ولتاژ ۱۰V - وصل شده و سورس توسط یک منبع جریان ثابت ۲/۵mA تغذیه می‌شود. ولتاژهای V_{GS} و V_{DS} و V_{GD} را به دست آورید.



☑ راه حل:

$$I_S = I_D - 2/5mA$$

$$KVL: -(-10) - 1K\Omega \times I_D - V_{GD} = 0 \rightarrow V_{GD} = 10 - 1 \times 2/5 = 7/5\,V$$

$$i_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{|V_P|}\right)^2 \Rightarrow 2/5 = 10\left(1 - \frac{V_{GS}}{3}\right)^2 \Rightarrow \frac{1}{4} = \left(1 - \frac{V_{GS}}{3}\right)^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 - \frac{V_{GS}}{3} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{V_{GS}}{3} = \frac{1}{2} \Rightarrow V_{GS} = 1/5V \\ 1 - \frac{V_{GS}}{3} = -\frac{1}{2} \Rightarrow \frac{V_{GS}}{3} = \frac{3}{2} \Rightarrow V_{GS} = 4/5V \end{cases}$$

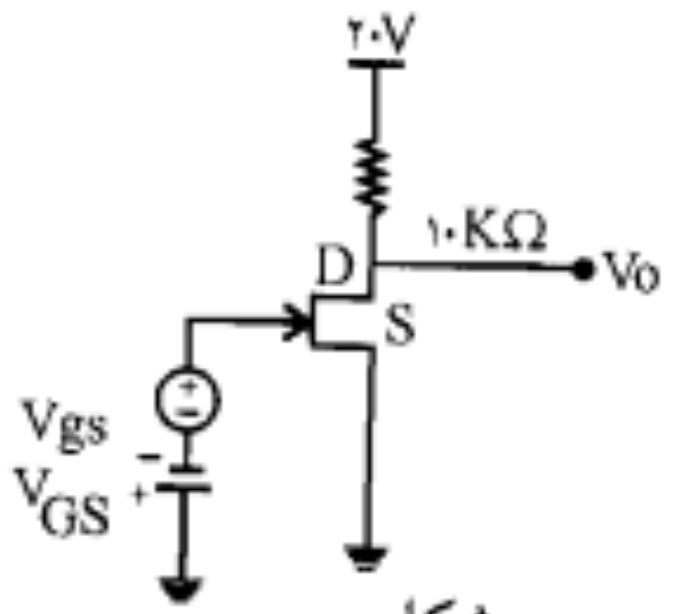
$V_{GS} = 4/5\,V$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت $V_{GS} > V_P$ می‌شود که شرط نادرستی می‌باشد ولی V_{GS} برابر ۱/۵V قابل قبول است.

$$V_{GS} = 1/5V$$

$$V_{GS} = V_{GD} + V_{DS} \Rightarrow$$

$$1/5V = V_{DS} + (+7/5) \Rightarrow V_{DS} = 1/5 - 7/5 = -6\,V$$

۴ ـ در مدار شکل م ـ ۴، JFET دارای $I_{DSS} = 16\ mA$ و $V_P = -4V$ است. برای $V_{GS} = -3V$ مقدار g_m و A_V را به دست آورید. برای یک سیگنال ورودی ۰/۱ V (موج مربعی) دامنه سیگنال خروجی در درین چقدر است؟ کمترین ولتاژ درین ـ سورس ممکن چقدر است؟

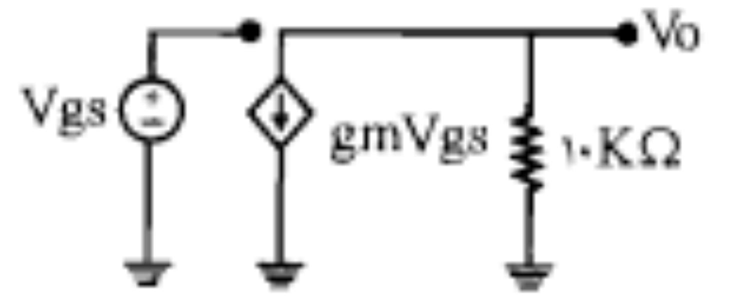


شکل م ـ ۴

☑ راه حل:

$$g_m = \frac{-2I_{DSS}}{V_P}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 16}{-4}\left(1 - \frac{-3}{-4}\right) = 8\left(\frac{1}{4}\right) = 2\frac{mA}{V}$$

مدار معادل:



$$A_V = \frac{V_O}{V_i}$$

$$V_O = -g_m V_{gs} \times 10K\Omega = -2 \times V_{gs} \times 10 = -20 V_{gs}$$

$$V_i = V_{gs}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{-20 V_{gs}}{V_{gs}} = -20$$

به ازای $V_{gs} = 0/1V \Rightarrow V_O = -20V_{gs} = -20 \times 0/1 = -2V$

کمترین ولتاژ درین ـ سورس:

کانال N: $V_{GS} <- |V_P| \Rightarrow V_{GD} < -4 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} < -4 \Rightarrow$

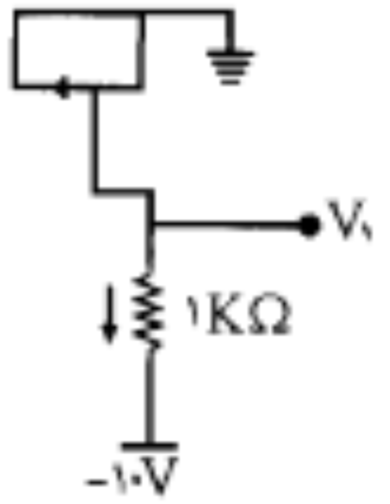
$$V_{DS} > V_{GS} + 4 \Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + V_{GS} + 4 \Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + (-3) + 4$$

$$\Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + 1$$

کمترین مقدار ولتاژ V_{DS} به ازای V_{gs} برابر صفر ولت به دست می‌آید.

$$V_{DS}(min) = 0 + 1 = 1V$$

۵ ـ در مدارهای شکل م ـ ۵ مقادیر ولتاژها و جریان‌های نشان داده شده را به دست آورید. برای کلیه JFETها $I_{DSS} = 4\ mA$ و $|V_P| = 2V$ است.



☑ راه حل:

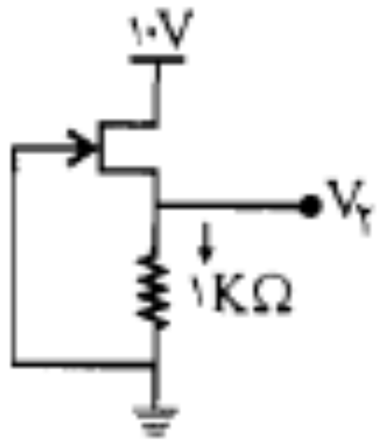
در این مدار گیت و سورس به‌هم متصل می‌باشند پس $V_{GS} = 0$ می‌باشد در نتیجه طبق رابطه I_D داریم:

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = I_{DSS} = 4mA$$

www.PnuEB.com

و چون JFET از نوع کانال P می‌باشد پس جهت جریان در جهت نشان داده شده می‌باشد. (از سورس به سمت درین)

$KVL: V_1 - 1\times I_D - (-10) = 0 \Rightarrow V_1 - 4 + 10 = 0 \Rightarrow V_1 = -6V$



$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - V_2 = -V_2$

چون JFET از نوع کانال N می‌باشد پس $V_P < 0$ می‌باشد یعنی $V_P = -2V$ و جهت جریان در جهت نشان داده شده می‌باشد.

$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 4\left(1-\frac{(-V_2)}{-2}\right)^2 \simeq 4\left(1-\frac{V_2}{2}\right)^2 \quad (I)$$

$$KVL: V_2 = 1\times I_D = I_D \quad (II)$$

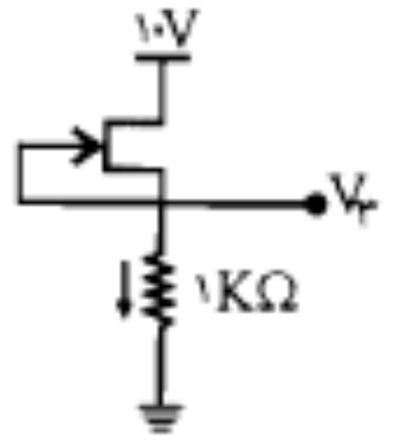
با جایگذاری (II) در (I) داریم:

$$V_2 = 4\left(1-\frac{V_2}{2}\right)^2 \Rightarrow V_2 = (2-V_2)^2 = 4 + V_2^2 - 4V_2 \Rightarrow V_2^2 - 5V_2 + 4 = 0$$

با حل این معادله درجه (۲) داریم:

$$\begin{cases} V_2 = 1V \\ V_2 = 4V \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_2 = 1V \Rightarrow V_{GS} = -V_2 = -1 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول} \\ V_2 = 4V \Rightarrow V_{GS} = -V_2 = -4 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases} \Rightarrow V_2 = 1V$$

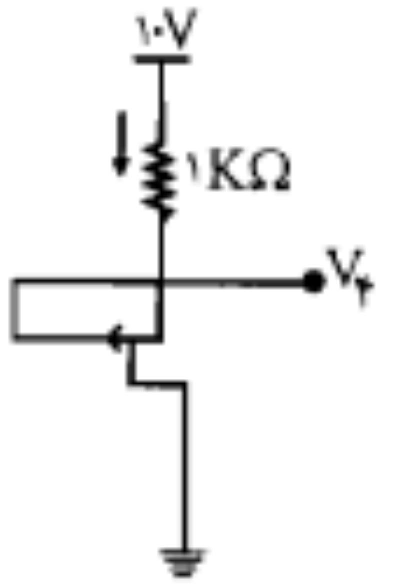


$V_3 = 1\times I_D = I_D$

از طرفی در این مدار گیت و سورس به هم متصل می‌باشند ⇐

$V_{GS} = 0 \Rightarrow$

$I_D = I_{DSS} = 4mA \Rightarrow V_3 = I_D = 4V$



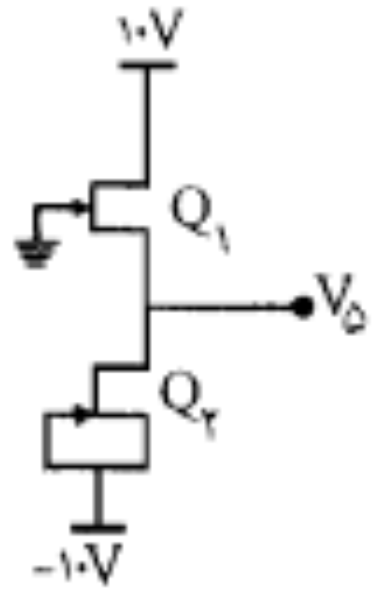
در این مدار نیز گیت و سورس به هم متصل می‌باشند پس:

$V_{GS} = 0$

$\Rightarrow I_D = I_{DSS} = 4mA$

از طرفی: $V_4 = 10 - 1\times I_D = 10 - 1\times 4 = 6V$

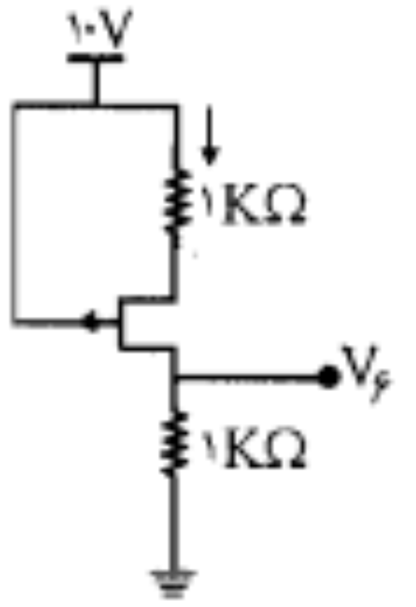
در مدار مقابل: در Q_2 گیت و سورس به هم متصل می‌باشند پس: $V_{GS_2} = 0$ می‌باشد پس:



$I_{D_2} = I_{DSS} = 4mA$ از طرفی این جریان I_{D_2} همان جریان Q_1 می‌باشند یعنی $I_{D_1} = I_{D_2}$ پس $I_{D_1} = I_{D_2} = I_{DSS}$ یعنی در Q_1 نیز $V_{GS_1} = 0$ می‌باشد پس:

$V_{GS_1} = 0 \Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = 0 \Rightarrow 0 - V_{S_1} = 0 \Rightarrow$

$-V_{S_1} = 0 \Rightarrow V_{S_1} = V_5 = 0 \Rightarrow V_5 = 0V$



در این مدار: چون از نوع کانال P می‌باشد پس $V_P > 0$ می‌باشد یعنی

$V_P = 2V$

از طرفی: $V_{GS} = 1\times I_D = I_D$

در نتیجه در رابطه I_D داریم:

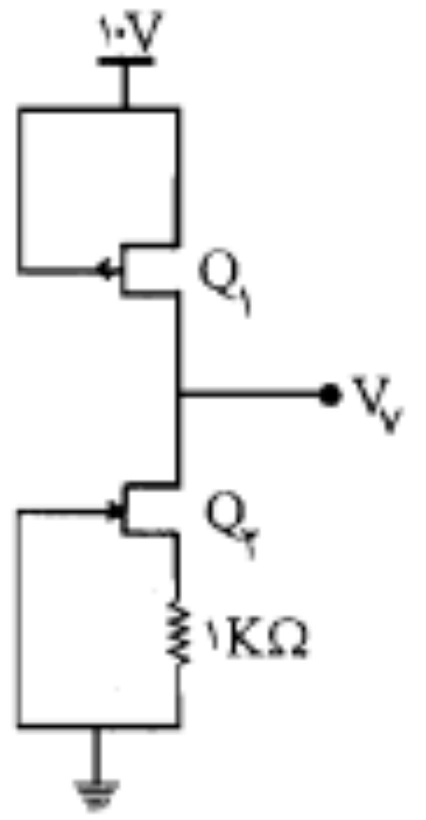
$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_D = 4\left(1-\frac{I_D}{2}\right)^2 = (2-I_D)^2 = 4 + I_D^2 - 4I_D \Rightarrow$$

$$I_D^2 - 5I_D + 4 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_D = 4 \\ I_D = 1 \end{cases}$$

$I_D = 4mA$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت $I_D = I_{DSS}$ می‌شود که در این حالت باید $V_{GS} = 0$ پس $I_D = 4mA$ قابل قبول نمی‌باشد پس $I_D = 1mA$ می‌باشد.

$V_6 = 1\times I_D = 1\times 1mA = 1V$



در Q_1 داریم: $V_{GS_1} = 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_{DSS}$ از طرفی این جریان همان جریان Q_2 می‌باشند پس $I_{D_1} = I_{D_2} = I_{DSS}$ پس باید $V_{GS_2} = 0$ شود:

$V_{GS_2} = 0 \Rightarrow V_{G_2} - V_{S_2} = 0 \Rightarrow 0 - V_{S_2} = 0 \Rightarrow V_{S_2} = 0$

که این حالت امکان ندارد چون در این صورت $I_{D_2} = 0$ می‌شود در صورتی که می‌دانیم $I_{D_1} = I_{D_1} = 4mA$ پس $V_{GS_2} \neq 0$ می‌باشد در این صورت در Q_2 خواهیم داشت: (n کانال)

$$I_{D_2} = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS_2}}{V_P}\right)^2 = 4\left(1-\frac{V_{G_2}-V_{S_2}}{-2}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_{D_2} = 4\left(1-\frac{0-1\times I_{D_2}}{-2}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} I_{D_2} = 4 \\ I_{D_2} = 1 \end{cases}$$

www.PnuEB.com

$I_{D_۲} = ۴\,mA$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت $I_{D_۲} = I_{DSS}$ یعنی $V_{GS_۲} = ۰$ می‌شود که قابل قبول نمی‌باشد پس $I_{D_۲} = ۱mA \Leftarrow I_۷ = I_{D_۲} = ۱\,mA$

$KVL: V_۷ = ۱۰ + V_{DS_۱}$

از طرفی $Q_۱$ در حالت اشباع نمی‌باشد چون با $V_{GS_۱} = ۰$ جریان $I_{D_۱} = I_{DSS} = ۴\,mA$ می‌باشد که قابل قبول نیست و $I_{D_۱} = ۱\,mA$ می‌باشد پس $Q_۱$ در حالت تریودکار می‌کند و در این حالت داریم: رابطه (۷ـ۲) کتاب

$$I_{D_۱} = I_{DSS}\left[۲\left(\frac{V_{GS}}{V_P} - ۱\right)\frac{V_{DS_۱}}{V_P} - \left(\frac{V_{DS_۱}}{V_P}\right)^۲\right]$$

$$\Rightarrow I_{D_۱} = ۴\left[۲\left(\frac{۰}{۲} - ۱\right)\frac{V_{DS_۱}}{۲} - \left(\frac{V_{DS_۱}}{۲}\right)^۲\right] \Rightarrow V_{DS_۱}^۲ + ۴V_{DS_۱} + ۱ = ۰$$

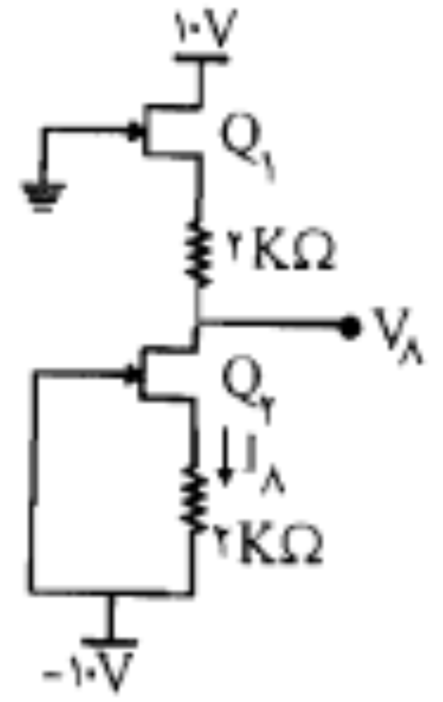
$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS_۱} = -۰/۲۷ \\ V_{DS_۱} = -۳/۷۳ \end{cases}$$

در ناحیه تریود باید: $V_{GD_۱} < V_P$ یعنی $V_{GS_۱} - V_{DS_۱} < V_P$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS_۱} = -۳/۷۳ \Rightarrow ۰ - (-۳/۳۷۳)\ V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{DS_۱} = -۰/۲۷ \Rightarrow ۰ - (-۰/۲۷) < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_V = ۱۰ + V_{DS_۱} = ۱۰ - ۰/۲۷ = ۹/۶۳\ V$$

در $Q_۲$ داریم:



$$V_{GS_۲} = -۲I_{D_۲}$$

$$\Rightarrow I_{D_۲} = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS_۲}}{V_P}\right)^۲ = ۴\left(۱ - \frac{-۲I_{D_۲}}{-۲}\right)^۲ \Rightarrow$$

$$I_{D_۲} = ۴(۱ - I_{D_۲})^۲ \Rightarrow I_{D_۲} = \begin{cases} ۱/۶۴\,mA \\ ۰/۶۱\,mA \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{D_۲} = ۱/۶۴ \Rightarrow V_{GS_۲} = -۲I_{D_۲} = -۳/۲۸ < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ I_{D_۲} = ۰/۶۱ \Rightarrow V_{GS_۲} = -۲ \times ۰/۶۱ = -۱/۳۲ > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

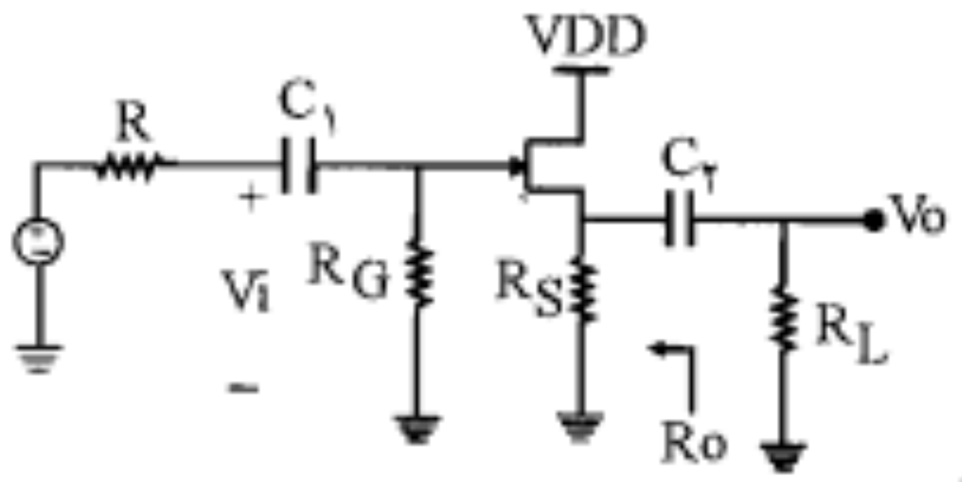
$$\Rightarrow I_۸ = I_{D_۲} = ۰/۶۱\,mA \Rightarrow I_{D_۱} = I_{D_۲} = ۰/۶۱$$

$$\Rightarrow I_{D_۱} = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{V_P}\right)^۲ \Rightarrow ۰/۶۱ = ۴\left(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{-۲}\right)^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_۱} = -۲/۷۸ \\ V_{GS_۱} = -۱/۲۲ \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{GS_۱} = -۲/۷۸ < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{GS_۱} = -۱/۲۲ > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \Rightarrow V_{G_۱} - V_{S_۱} = -۱/۲۲ \Rightarrow ۰ - V_{S_۱} = -۱/۲۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{S_۱} = ۱/۲۲ \Rightarrow V_۸ = V_{S_۱} - ۲I_{D_۱} = ۱/۲۲ - ۲ \times ۰/۶۱ = ۰^V \Rightarrow V_۸ = ۰\ V$$

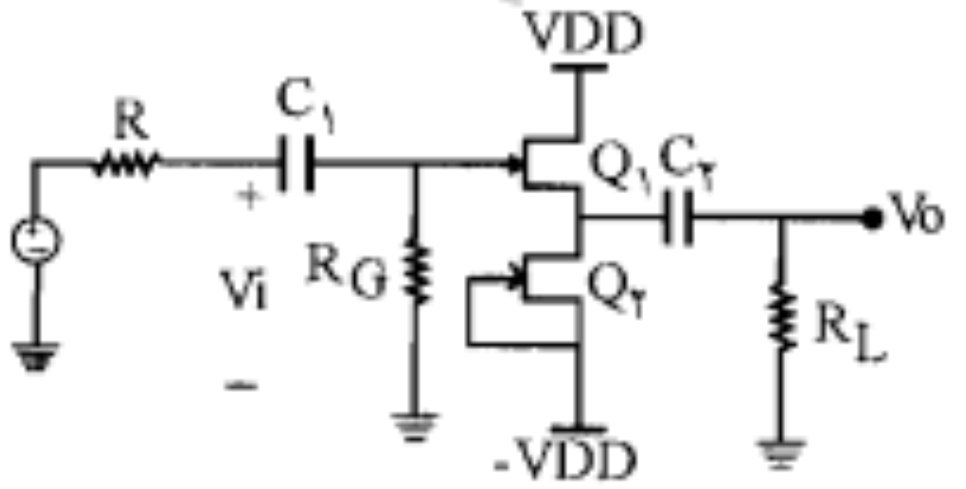
۶ـ در یک مدار سورس فالوئر شکل م ـ ۶ به جای مقاومت R_S می‌توان از یک JFET دیگر (مشابه اولی) استفاده نمود. گیت و سورس ایـن JFET بـه $-V_{DD}$ وصل شده و درین آن به سورس JFET اول متصل می‌شود. V_S مـدار سـورس فـالوئر چـقدر است؟ مقاومت خروجی سورس فالوئر را بـه دست آورید. با توجه به مقدار ولتاژ DC در سورس آیا در این حالت $C_۲$ مورد نیاز است؟



شکل م ـ ۶

☑ **راه حل:**

وقتی به جای R_S یک JFET با شرایط گفته شده در صورت مسأله قرار گیرد مدار به صورت شکل زیر در می‌آید.



$$Q_۲: V_{GS_۲} = ۰ \Rightarrow I_{D_۲} = I_{DSS}$$

از طرفی: $I_{D_۱} = I_{D_۲} \Rightarrow I_{D_۱} = I_{D_۲} = I_{DSS}$

$$\Rightarrow I_{D_۱} = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{V_P}\right)^۲ \Rightarrow I_{DSS} = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{V_P}\right)^۲ \Rightarrow V_{GS_۱} = ۰$$

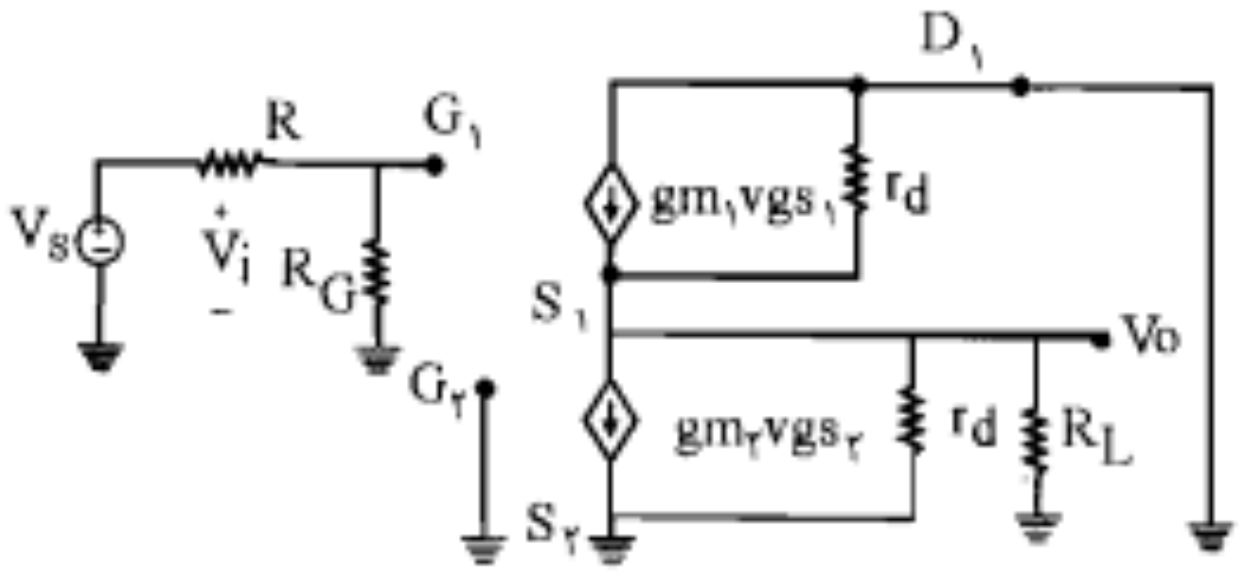
$\Rightarrow V_{G_۱} - V_{S_۱} = ۰$ از طرفی: $V_{G_۱} = ۰$

www.*PnuEB*.com

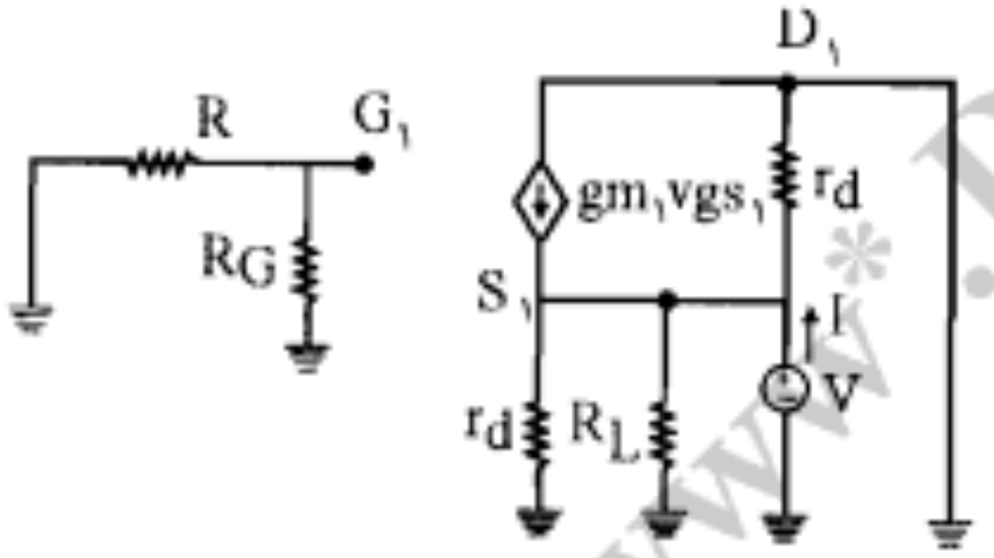
$$\Rightarrow 0 - V_{S_1} = 0 \Rightarrow V_{S_1} = V_S = 0$$

$$g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{-2I_{DSS}}{V_P}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)\Bigg|_{V_{GS}=0} \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{-2I_{DSS}}{V_P}$$

مدار معادل به صورت زیر در می‌آید:



برای اینکه مقاومت خروجی سورس فالوئر را به دست آوریم مدار معادل تون در دو سر R_L اجرا می‌کنیم.



$$V_{g_1} = 0 \quad \text{و} \quad V_{S_1} = V \Rightarrow V_{gs_1} = V_{g_1} - V_{s_1} = 0 - V = -V$$

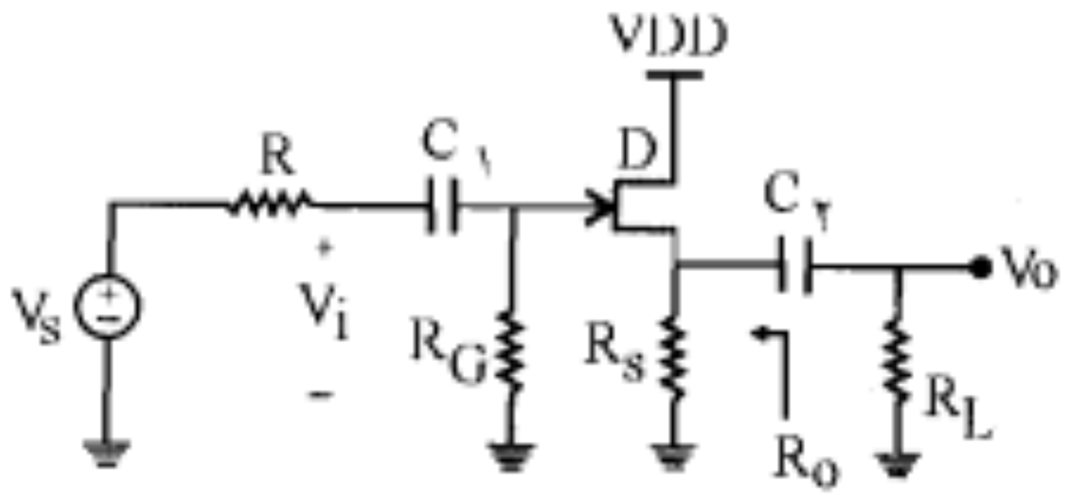
$$I = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m V_{gs_1} + \frac{V}{r_d} = V\left(\frac{1}{R_L} + \frac{2}{r_d}\right) - (g_m V_{gs_1})$$

$$= V\left(\frac{1}{R_L} + \frac{2}{r_d}\right) - g_m(-V) = V\left(\frac{1}{R_L} + \frac{2}{r_d} + g_m\right)$$

$$\rightarrow R'_O = R_{th} = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{2}{r_d} + g_m} = \frac{R_L \times r_d}{r_d + 2R_L + g_m r_d R_L}$$

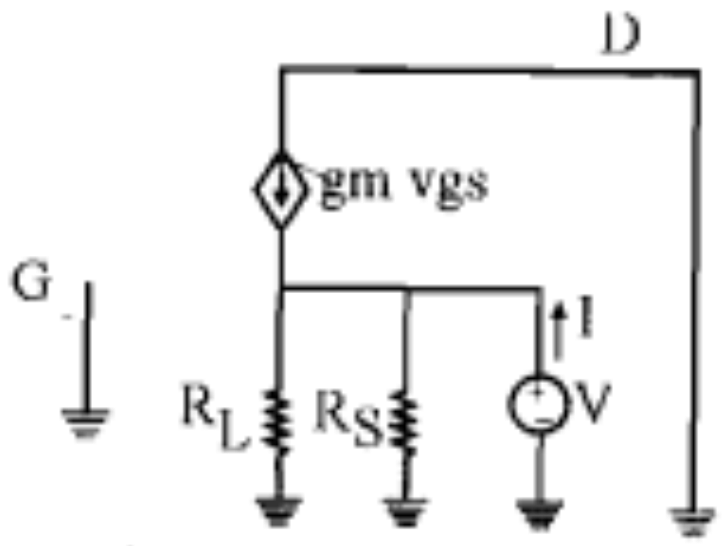
مقداری که برای V_S به دست آمده برابر صفر می‌باشد که مشخص می‌شود که وجود خازن C_2 دیگر نیاز نمی‌باشد چرا که خروجی V_O مؤلفه DC ندارد لذا می‌توانیم کوپلاژ مستقیم داشته باشیم.

۷ـ در مدار شکل م ـ ۶ با فرض $g_m = 2\frac{mA}{V}$ و $R_S = 10\,K\Omega$ و $R_L = 10\,K\Omega$، مقاومت R_O و A_V را به دست آورید.



☑ راه حل:

برای به دست آوردن R_O، در دو سر R_L تونن را اجرا می‌کنیم. V_S را برابر صفر قرار می‌دهیم. (از r_d به دلیل بزرگ بودن صرفنظر شده است.)



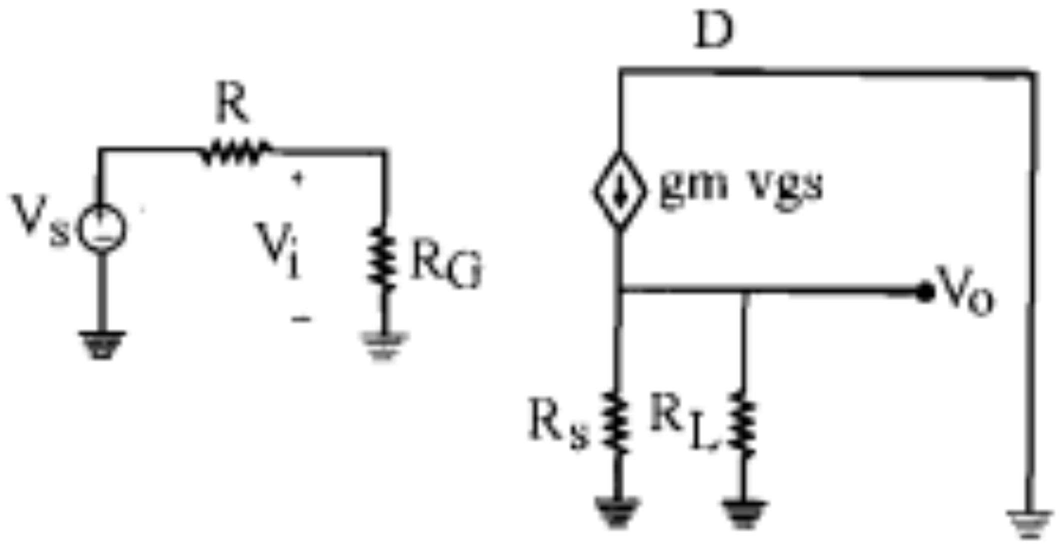
$$KCL: \frac{V}{R_L} + \frac{V}{R_S} = g_m V_{gs} + I \Rightarrow V\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_S}\right) = g_m V_{gs} + I \qquad (I)$$

از طرفی داریم: $\begin{cases} V_g = 0 \\ V_S = V \end{cases} \Rightarrow V_{gs} = V_g - V_s = 0 - V = -V$

$$(I) \Rightarrow V\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10}\right) = g_m(-V) + I \Rightarrow V(0/2 + 2) = I$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{2/2} = 0/454\ K\Omega = 454\ \Omega$$

به دست آوردن A_V:



$$KCL: V_O\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_S}\right) = g_m V_{gs} \Rightarrow V_O = g_m V_{gs} \times \frac{R_L R_S}{R_L + R_S}$$

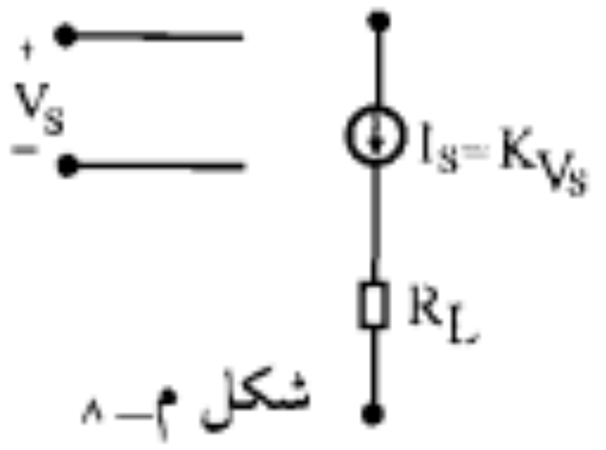
www.PnuEB.com

$$= 2V_{gs} \times \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 10\,V_{gs}$$

از طرفی: $V_i = V_O + V_{gs} = 10\,V_{gs} + V_{gs} = 11\,V_{gs}$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{10\,V_{gs}}{11\,V_{gs}} = 0/91$$

۸ـ با کمک JFET، B_jT و دیود به تعداد دلخواه یک منبع جریان I_S، مطابق شکل م ـ ۸، که تابعی خطی از یک ولتاژ V_S باشد را طوری طراحی کنید که بار متغیر ($0 < R_L < 1K\Omega$) را تغذیه کند. V_S بین صفر تا ۵ ولت تغییر می‌کند (K نباید خیلی کوچک انتخاب شود).

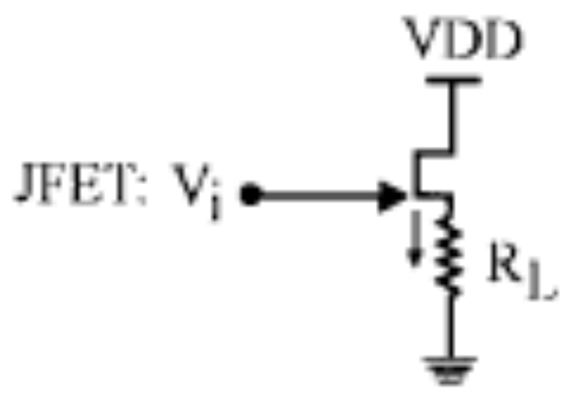


شکل م ـ ۸

☑ راه حل:

N کانال ⇐ $V_P < 0$

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{|V_P|}\right)^2 \Rightarrow$$



$$\Rightarrow I_D = I_{DSS}\left(1 + \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = I_{DSS}\left(\frac{V_P + V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

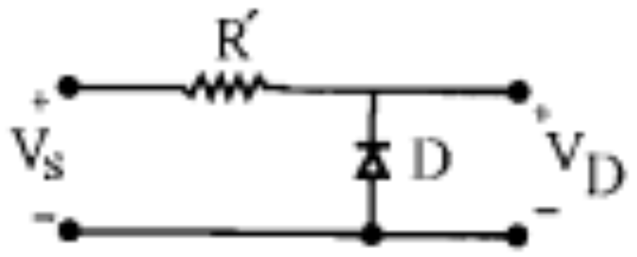
اگر $V_{GS} = -V_P + K'\sqrt{V_S}$ باشد در این صورت داریم: ($V_{GS} < 0$ باید باشد)

$$I_D = I_{DSS}\left(\frac{K'\sqrt{V_S}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_D = \frac{I_{DSS}}{(V_P)^2} \times K'^2 \times V_S$$

$$K'^2 \times \frac{I_{DSS}}{(V_P)^2} = K \Rightarrow I_D = K \times V_S \Rightarrow$$

این همان فرم I_S می‌باشد.

بنابراین باید V_{GS} به صورت $V_{GS} = -V_P + K'\sqrt{V_S}$ باشد اگر V_S به دیودی اعمال می‌شود در دو سر دیود چنین ولتاژی را خواهیم داشت:



$$V_D = V_S - R'I_D \qquad (I)$$

رابطه I_D در دیود به صورت مقابل می‌باشد:

$$I_D = I_O\left(e^{\frac{-V_D}{\eta V_T}} - 1\right)$$

فرض $\eta = 1 \Rightarrow I_D = I_O\left(e^{\frac{-V_D}{V_T}} - 1\right)$

اگر $\frac{V_D}{V_T}$ کوچک باشد با بسط $e^{-\frac{V_D}{V_T}}$ خواهیم داشت:

$$I_D = I_O\left[1 - \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2}\left(\frac{V_D}{V_T}\right)^2 + \dots - 1\right] \Rightarrow I_D = -I_O \times \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2} I_O\left(\frac{V_D}{V_T}\right)^2$$

این رابطه را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$V_D = V_S - R'\left[-I_O \times \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2} I_O \times \left(\frac{V_D}{V_T}\right)^2\right]$$

$$\Rightarrow V_D = V_S + \frac{R'I_O}{V_T} V_D - \frac{R'}{2} I_O\left(\frac{V_D}{V_T}\right)^2$$

$\frac{R'I_O}{V_T}$ را برابر یک در نظر می‌گیریم یعنی $R' = \frac{V_T}{I_O}$ در نظر گرفته می‌شود در این صورت خواهیم داشت:

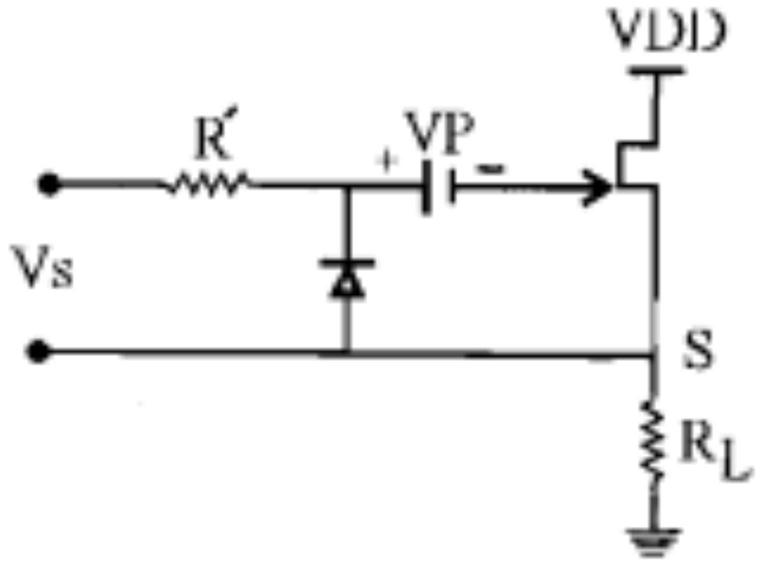
$$V_S = \frac{R'}{2} I_O\left(\frac{V_D}{V_T}\right)^2 \Rightarrow V_D = V_T \times \sqrt{\frac{2}{R'I_O}} \times \sqrt{V_S}$$

رابطه V_{GS} را ملاحظه می‌کنیم $K'\sqrt{V_S}$ نیاز بود که ولتاژ دو سر V_D چنین فرمی داشته باشد بنابراین:

$$K' = V_T\sqrt{\frac{2}{R'I_O}} = \sqrt{2V_T}$$

خواهد شد و این ولتاژ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

اما در رابطه V_{GS} ، $-V_P$ نیز است که به صورت یک باطری اضافه می‌شود و مدار شکل زیر پاسخگوی منبع جریان I_S خواهد شد.



در این مدار $V_{GS} = -V_P + V_D$ می‌باشد که V_D به صورت $K'\sqrt{V_S}$ می‌باشد بنابراین: $I_D = K\sqrt{V_S}$ شده و K عبارت است از:

$$K = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} \times K'^2$$

و با جایگزینی $K' = \sqrt{2V_T}$ داریم:

$$K = \frac{2I_{DSS}}{V_P^2} \times V_T$$

www.PnuEB.com

شرط اینکه مدار درست کار کند این است که شرایط ناحیه اشباع برقرار باشد یعنی باید داشته باشیم:

$$-V_P < V_{GS} < 0 \quad , \quad V_{GD} < -V_P$$

با جایگزینی V_{GS} داریم: $-V_P < -V_P + K'\sqrt{V_S} < 0 \Rightarrow K'\sqrt{V_S} > 0 \quad , \quad K'\sqrt{V_S} < V_P$

چون V_S مثبت و K' نیز مثبت است لذا شرط اول همواره برقرار می‌باشد و برای اینکه شرط دوم برقرار باشد باید داشته باشیم:

$$K'\sqrt{V_S} < V_P \Rightarrow \sqrt{2V_T}\times\sqrt{V_S} < V_P$$

چون V_S ماکزیمم ۵ است پس V_S را ۵ در نظر می‌گیریم.

$$\Rightarrow \sqrt{2\times 26\times 10^{-3}}\times\sqrt{5} < V_P \Rightarrow \sqrt{26\times 10^{-2}} < V_P \Rightarrow V_P > 0.51\,V$$

و همچنین برای اینکه در حالت اشباع باشیم باید $V_{GD} < -V_P$ باشد.

$$V_{GS} - V_{DS} < -V_P \Rightarrow -V_P + K'\sqrt{V_S} - (V_D - V_S) < -V_P \Rightarrow$$

$$K'\sqrt{V_S} < V_D - V_S \Rightarrow K'\sqrt{V_S} < V_{DD} - R_L I_D$$

$$\Rightarrow \sqrt{2V_T}\times\sqrt{V_S} < V_{DD} - KV_S\times R_L \Rightarrow V_{DD} > \sqrt{2V_T}\times\sqrt{V_S} + KV_S\times R_L$$

$$\Rightarrow V_{DD} > \sqrt{2\times 26\times 10^{-3}\times V_S} + \frac{2I_{DSS}\times V_T^2}{V_P^2}\times V_S\times R_L$$

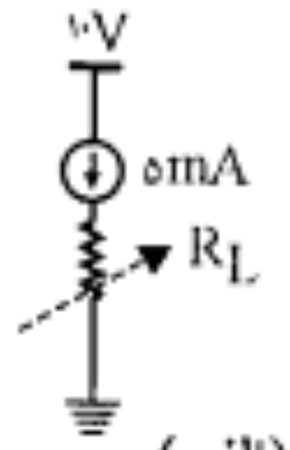
کمترین مقدار V_{DD} به ازای R_L و V_S ماکزیمم به‌دست می‌آید و همچنین باید V_P مینیمم باشد.

$(V_P(\min) = 0.51)$

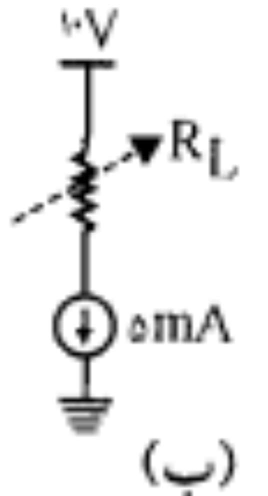
$$\Rightarrow V_{DD} > 0.51 + \frac{2I_{DSS}\times 26\times 10^{-3}}{(0.51)^2}\times 5\times 1 \Rightarrow V_{DD} > 0.51 + I_{DSS}$$

با این شرط و شرط $0.51 < V_P$ مدار فوق پاسخگوی منبع جریان خواسته شده می‌باشد.

۹ ـ با یک JFET با پارامترهای $|V_P| = 2.5V$ ، $I_{DSS} = 8mA$ و $r_d = 250K\Omega$ و یا با یک BJT با پارامترهای $h_{fe} = 300$ و $h_{oe}^{-1} = 100K\Omega$ می‌خواهیم منابع جریان م‌ـ۹ را برای $0 < R_L < 1.4K\Omega$ طراحی کنیم. برای هر یک از مدارهای شکل م ـ ۹ یک بار با JFET و بار دیگر با BJT مدار خود را طراحی کنید.

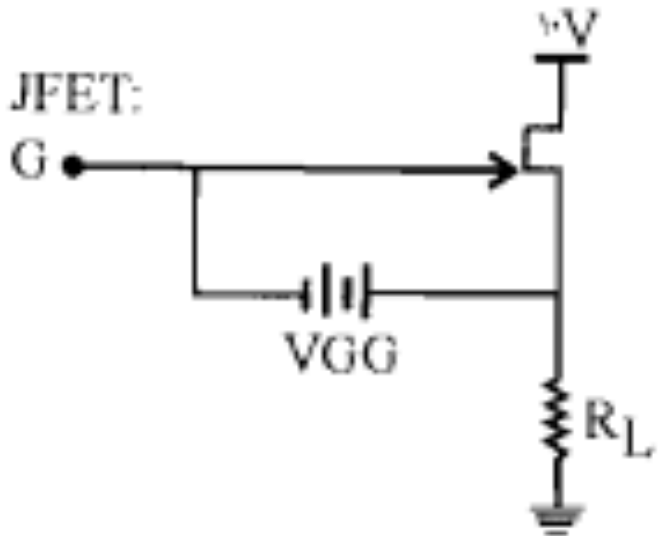


(الف)



(ب)

☑ **راه حل:**



ابتدا مدار مقابل را در نظر می‌گیریم اگر JFET در ناحیه اشباع کار کند در این صورت $I_D = 5mA$ (JFET از نوع کانال N انتخاب شده است.)

$$\Rightarrow V_P = -2.5\,V$$

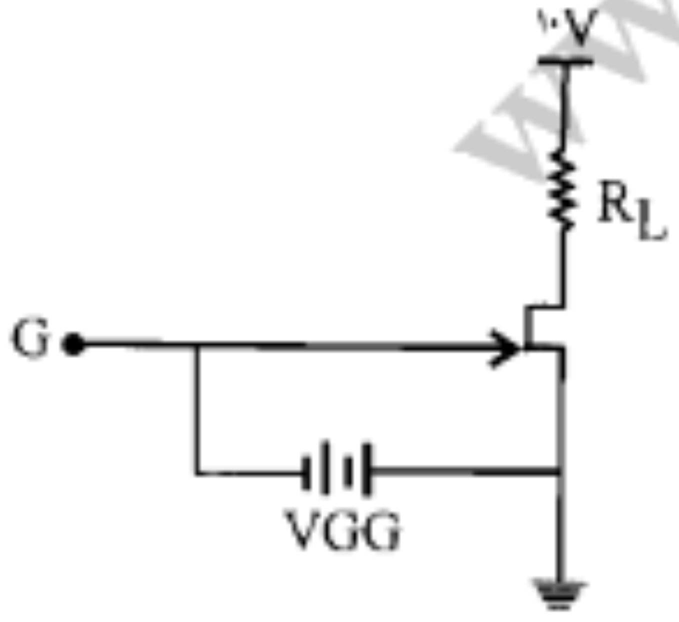
$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow 5 = 8\left(1-\frac{V_{GS}}{-2.5}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -4.475 \\ V_{GS} = -0.525 \end{cases}$$

$V_{GS} = -4.475 < V_P$ می‌باشد در نتیجه قابل قبول نمی‌باشد پس $V_{GS} = -0.525$ چون بزرگتر از V_P می‌باشد پس قابل قبول می‌باشد یعنی $V_{GS} = -0.525V$ می‌باشد. حال باید ببینیم به ازاء مقادیر R_L آیا JFET در ناحیه اشباع کار می‌کند یا خیر؟

$$V_{GD} = V_G - V_D = (V_{GS} + V_S) - V_D = -0.525 + 5R_L - 10$$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = 1.4K\Omega$ کوچکتر از V_P می‌باشد یعنی $R_L = 1.4K\Omega$ در این رابطه صدق می‌کند و $V_{GG} = -V_{GS} = 0.525V$ پس مدار فوق با JFET با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل الف می‌باشد.

شکل (ب) با JFET:



با $V_{GS} = -0.525V$ مانند مدار قبلی $I_D = 5mA$ شده و باید ببینیم به ازای مقادیر داده شده برای R_L ، JFET در ناحیه اشباع می‌باشد یا نه؟

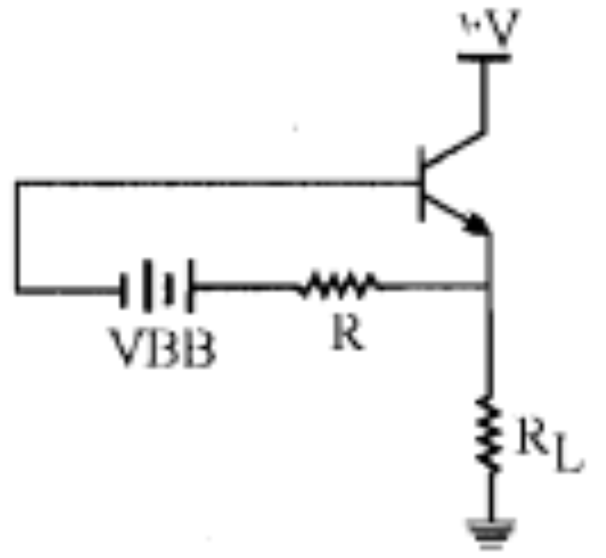
$$V_{GD} = V_G - V_D = -0.525 - (10 - 5R_L) < V_P = -2.5$$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = 1.4K\Omega$ باید صادق باشد رابطه فوق صادق است.

$$V_{GD} = -0.525 - 10 + 5\times 1.4 = -3.525 < -2.5 \Rightarrow$$

پس مدار فوق با $V_{GG} = -V_{GS} = 0.525V$ با JFET با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل (ب) می‌باشد. (مقاومت r_d برای تعیین مقدار مقاومت خروجی به کار می‌رود.)

مدار شکل الف با BJT :



اگر BJT در ناحیه فعال باشد و $I_C = ۵mA$ در این صورت مدار پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل الف خواهد بود (BJT از نوع npn انتخاب شده است.)

فرض: $R = ۱۵K\Omega : V_{BB} - V_{BE} = RI_B \Rightarrow V_{BB} = V_{BE} + R \times \frac{I_C}{h_{fe}}$

$\Rightarrow V_{BB} = ۰/۷ + ۱۵ \times \frac{۵}{۳۰۰} = ۰/۹۵V$

حال باید ببینیم BJT به ازای مقادیر داده شده برای R_L در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؛ یعنی باید داشته باشیم:

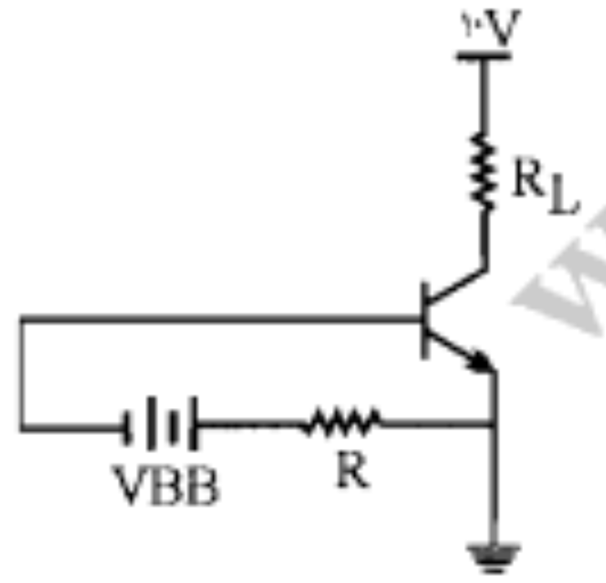
$V_{CE} = V_C - V_E = ۱۰ - R_L I_C = ۱۰ - ۵R_L > ۰/۲V$

این رابطه باید به ازای ماکزیمم مقدار R_L صادق باشد یعنی به ازای $R_L = ۱/۴K\Omega$:

$V_{CE} = ۱۰ - ۵ \times ۱/۴ = ۳ > ۰/۲V$

می‌بینیم که رابطه صادق بوده و مدار فوق با $V_{BB} = ۰/۹۵V$ با BJT با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل (الف) می‌باشد.

مدار شکل (ب) با BJT :



با $V_{BB} = ۰/۹۵V$ مانند مدار قبلی $I_C = ۵mA$ می‌باشد و باید ببینیم به ازای مقادیر داده شده برای R_L، BJT در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؟ باید داشته باشیم:

$V_{CE} = V_C - V_E = ۱۰ - I_C \times R_L - ۰ = ۱۰ - ۵R_L > ۰/۲V$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L، BJT در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؟ باید داشته باشیم:

$V_{CE} = V_C - V_E = ۱۰ - I_C \times R_L - ۰ = ۱۰ - ۵R_L > ۰/۲V$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = ۱/۴K\Omega$ باید صادق باشد:

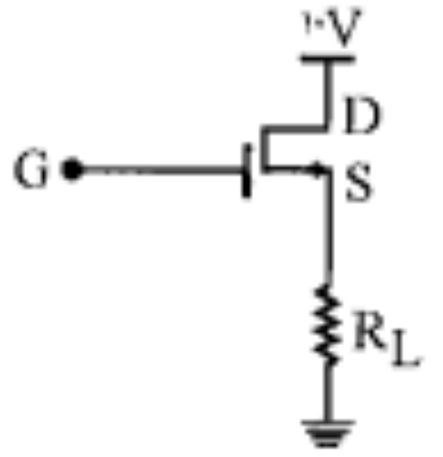
$V_{CE} = ۱۰ - ۵ \times ۱/۴ = ۳ > ۰/۲V$

می‌بینیم که رابطه صادق بوده و مدار فوق با $V_{BB} = ۰/۹۵V$ با BJT با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل ب می‌باشد. (مقاومت h_{oe}^{-1} در تعیین مقدار مقاومت خروجی به کار می‌رود.)

۱۰ ـ مسأله ۹ را با MOSFETهای ارتقایی از نوع N و P که دارای پارامترهای $|V_T| = ۲V$ و $K = ۱\frac{mA}{V^۲}$ هستند، تکرار کنید.

☑ **راه حل:**

شکل الف: MOS را از نوع N انتخاب می‌کنیم:



$I_D = I_S = \frac{K}{۲}(V_{GS} - V_T)^۲$

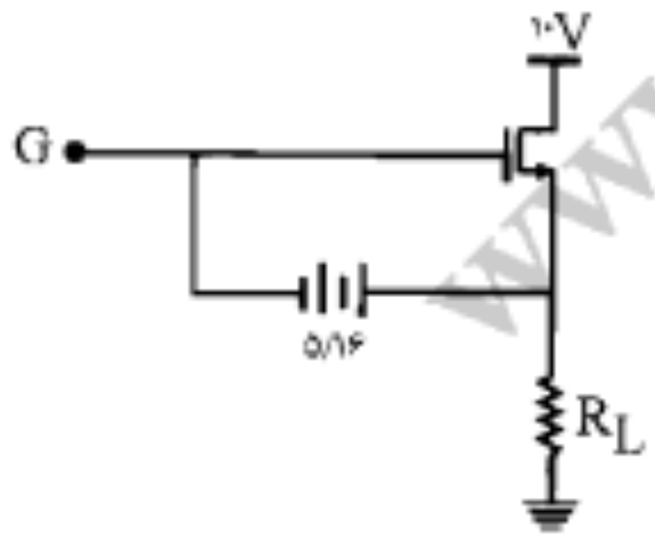
MOS از نوع N می‌باشد در نتیجه $V_T > ۰$ می‌باشد.

$\Rightarrow ۵ = \frac{۱}{۲}(V_{GS} - ۲)^۲$

$\Rightarrow ۱۰ = (V_{GS} - ۲)^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = ۵/۱۶V \\ V_{GS} = -۱/۱۶V \end{cases}$

در MOSFET نوع ارتقایی از نوع N باید: $V_{GS} > V_T$ باشد پس $V_{GS} = -۱/۱۶$ قابل قبول نمی‌باشد ولی $V_{GS} = ۵/۱۶V > V_T$ پس قابل قبول می‌باشد: $V_{GS} = ۵/۱۶V$

پس در مدار بالا باید بین G و S یک منبع ولتاژ به اندازه $V_{GS} = ۵/۱۶V$ قرار داده شود شرط اینکه مدار در حالت اشباع باشد به صورت زیر است:

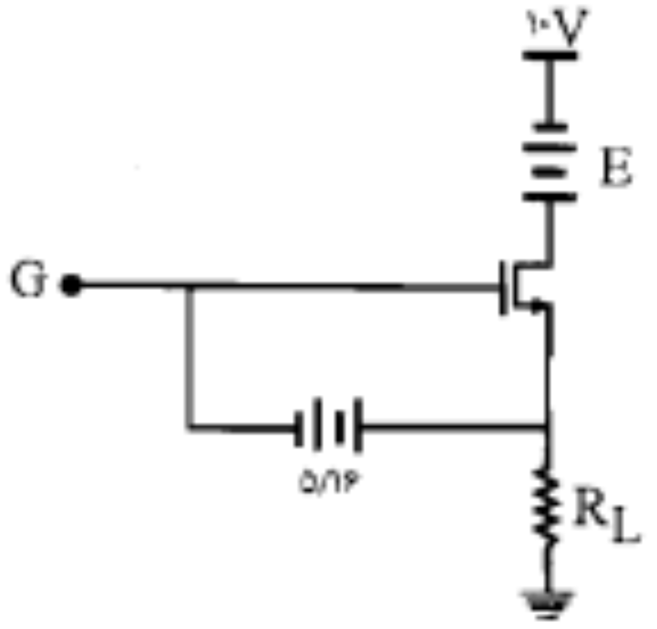


$V_{GD} < V_T \Rightarrow V_G - V_D < V_T \Rightarrow (V_{GS} + V_S) - V_{DD} < V_T$

$\Rightarrow (۵/۱۶ + R_L \times I_D) - ۱۰ < ۲ \Rightarrow R_L < \frac{۲ + ۴/۸۴}{I_D}$

$\Rightarrow R_L < \frac{۶/۸۴}{۵} = ۱/۳۷K\Omega$

چون در صورت مسأله $۰ < R_L < ۱/۴K\Omega$ می‌باشد پس باید در مدار فوق یک منبع ولتاژی مانند E اضافه شود.



شرط اشباع: $V_{GD} < V_T \Rightarrow (V_G - V_D) < V_T$

$\Rightarrow (V_{GS} + V_S) - (V_{DD} + E) < V_T$

$\Rightarrow (۵/۱۶ + I_D \times R_L) - (۱۰ + E) < ۲$

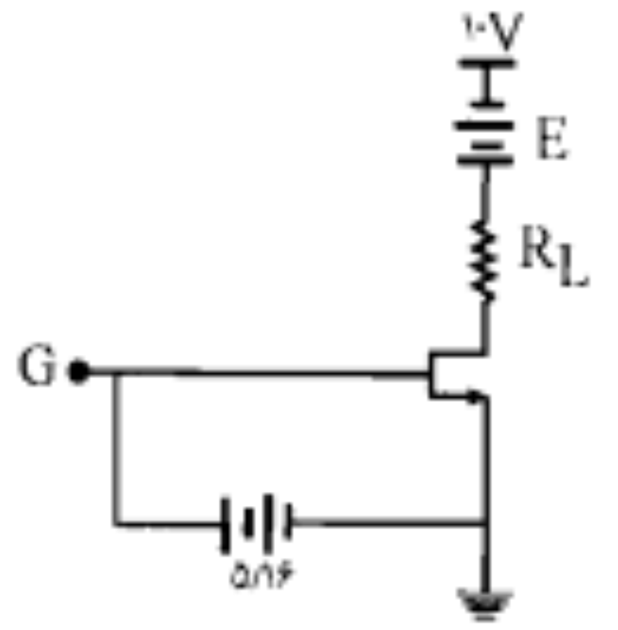
$\Rightarrow E > -۶/۸۴ + R_L I_D = -۶/۸۴ + ۵R_L$

www.PnuEB.com

رابطه بالا باید به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = ۱/۴\,K\Omega$ صادق باشد پس:

$$E > -۶/۸۴ + ۵ \times ۱/۴ = ۰/۱۶\,V$$

شکل (ب) با NMOS به صورت زیر می‌باشد:



شکل (الف) با PMOS:

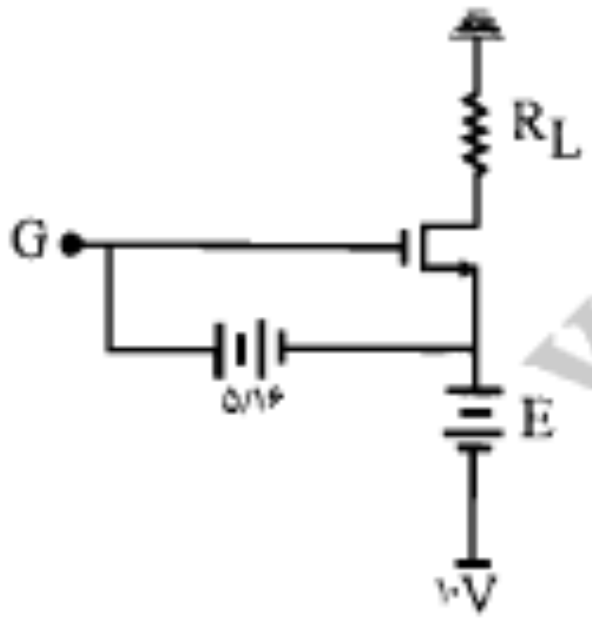
در PMOS ، V_T منفی می‌باشد یعنی $V_T = -۲V$:

$$I_D = I_S = \frac{K}{۲}(V_{GS} - V_T)^۲$$

$$\Rightarrow I_D = I_S = \frac{۱}{۲}(-۵/۱۶ + ۲)^۲ \simeq ۵mA$$

شرط اینکه مدار در حالت اشباع باشد:

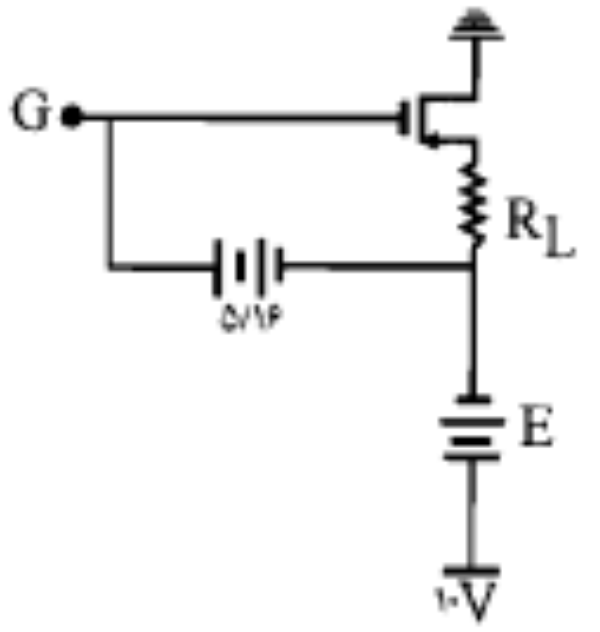
$$V_{GD} > V_T \Rightarrow V_G - V_D > V_T \Rightarrow (V_{GS} + E + ۱۰) - I_D \times R_L > V_T$$



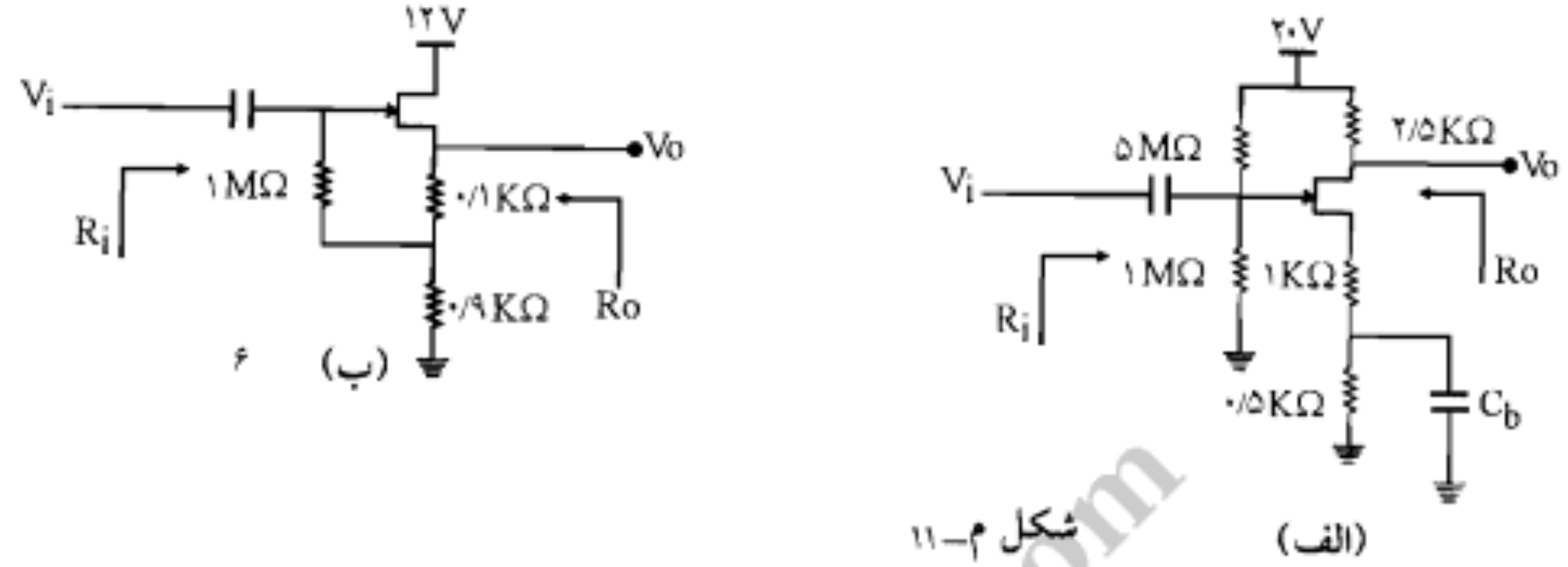
$$\Rightarrow (-۵/۱۶ + E + ۱۰) - ۵R_L > -۲ \Rightarrow E > -۶/۸۴ + ۵R_L$$

$$= -۵/۸۴ + ۵ \times ۱/۴ = ۰/۱۶\,V$$

شکل (ب) با PMOS به صورت زیر می‌باشد:



۱۱ ـ در هر یک از تقویت‌کننده‌های شکل م ـ ۱۱ مقادیر A_V ، R_i ، R_O و حداکثر دامنه نوسان متقارن برای آنکه تقویت‌کننده در ناحیه اشباع باقی بماند را بـه دست آوریـد. JFET دارای پـارامـترهای $I_{DSS} = ۱۰\,mA$ و $|V_P| = ۲V$ و $r_d = ۲۰۰\,K\Omega$ هستند.



شکل م ـ ۱۱

☑ راه حل:

الف)

$$\begin{cases} V_G = \dfrac{۲۰ \times ۱M\Omega}{۱ + ۵} = \dfrac{۱۰}{۳}\,V \\ V_S = (۱K\Omega + ۰/۵K\Omega) \times I_D = ۱/۵ I_D \end{cases} \Rightarrow V_{GS} = \frac{۱۰}{۳} - ۱/۵ I_D \Rightarrow I_D = \frac{۲۰ - ۶V_{GS}}{۹} \quad (I)$$

از طرفی طبق رابطه I_D داریم:

$$I_D = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^۲$$

(JFET ها از نوع کانال n می‌باشند پس $V_P < ۰$ می‌باشد یعنی $V_P = -۲V$)

$$\Rightarrow I_D = ۱۰\left(۱ - \frac{V_{GS}}{-۲}\right)^۲ \quad (II)$$

به جای I_D در رابطه (II) ، I_D به دست آمده از رابطه (I) را قرار می‌دهیم:

$$\frac{۲۰ - ۶V_{GS}}{۹} = ۱۰\left(۱ - \frac{V_{GS}}{-۲}\right)^۲ \Rightarrow ۴۵V_{GS}^۲ + ۱۹۲V_{GS} + ۱۴۰ = ۰$$

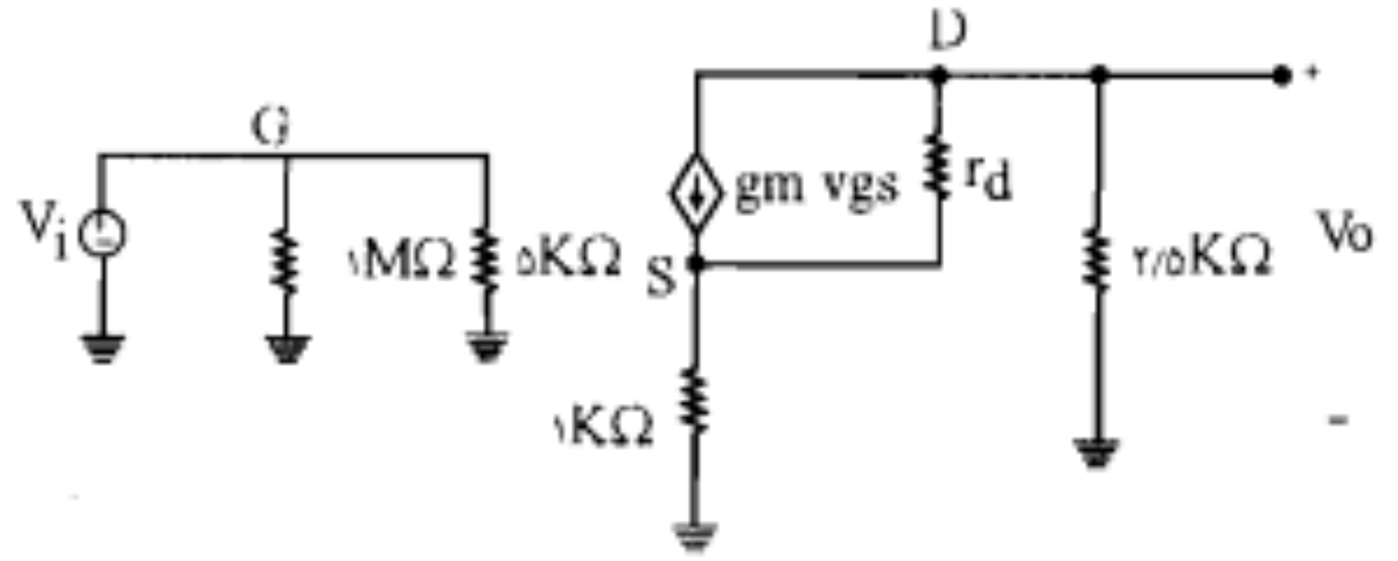
با حل این معادله درجه (۲) داریم:

$$\begin{cases} V_{GS} = -۰/۹۳ > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \\ V_{GS} = -۳/۱۳ \Rightarrow V_{GS} < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases} \quad V_{GS} = -/۰۹۳$$

$$\Rightarrow g_m = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-۲ \times ۱۰}{-۲}\left(۱ - \frac{-۰/۹۳}{-۲}\right) = ۰/۵۳۵\,\frac{mA}{V}$$

www.PnuEB.com

حال مدار معادل را رسم می‌کنیم:



حال به جای منبع جریان $g_m V_{gs}$ از منبع ولتاژ $g_m v_{gs} r_d$ استفاده می‌کنیم. (تبدیل منبع جریان به منبع ولتاژ)

$$I = \frac{V}{۲/۵} + \frac{V - ۰/۸۴V}{۲۰۱} = V(\frac{۱}{۲/۵} + \frac{۰/۱۶}{۲۰۱}) = V \times ۰/۴۰۰۸$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۰/۴۰۰۸} = ۲/۴۹۵K\Omega$$

برای به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن:

با توجه به مدار معادل داریم:

$$V_{ds} = V_d - V_s = V_o - (i_d - \frac{V_{ds}}{r_d}) \times ۱K\Omega$$

$$\Rightarrow V_{ds} = -۲/۵ i_d - (i_d - \frac{V_{ds}}{r_d}) \times ۱K\Omega \Rightarrow V_{ds}(۱ - \frac{۱}{۲۰۰}) = -۳/۵ i_d$$

معادله خط بار ac: $\Rightarrow V_{ds} = \frac{-۳/۵ i_d}{۰/۹۹۵} = -۳/۵۱۸\, i_d$

معادله خط بار DC: $V_{DS} - V_{DSQ} = -۳/۵۱۸(i_D - i_{DQ})$ (۱)

$$i_{DQ} = \frac{-۶V_{GSQ} + ۲۰}{۹} = \frac{-۶ \times (-۰/۹۳) + ۲۰}{۹} = ۲/۸۴۲mA$$

$$V_{DSQ} = ۲۰ - (۲/۵ + ۱ + ۰/۵) \times I_{DQ} = ۲۰ - ۴ \times ۲/۸۴۲ = ۸/۶۳۲V$$

$$V_{ODS} = ۲۰ - ۲/۵ I_{DQ} = ۲۰ - ۲/۵ \times /۸۴۲ = ۱۲/۹V$$

در نقطه قطع که $i_D = ۰$ می‌باشد خروجی ماکزیمم می‌باشد یعنی $V_O(max) = ۲۰V$

V_{DS} مرز اشباع و تریود چنین می‌شود:

$$V_{GD} \le V_P \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le V_P \Rightarrow V_{DS} \ge -V_P + V_{GS}$$

رابطه فوق به ازای جمع مقادیر V_{GS} باید صادق باشد تا از ناحیه اشباع خارج نشویم و $V_{GS} = ۰$ بزرگترین مقدار ممکن سمت راست رابطه فوق می‌باشد که باید V_{DS} از این مقدار نیز بزرگتر باشد لذا داریم:

$$V_{DS} \ge -V_P + ۰ \Rightarrow V_{DS} \ge -V_P \Rightarrow V_{DS} \ge -(-۲) = ۲$$

بنابراین $V_{DS} = ۲V$ می‌تواند ماکزیمم مقدار جریان i_D را مشخص کند. با توجه به رابطه (۱) داریم:

$$V_{DS} - V_{DSQ} = -۳/۵۱۸(i_D - i_{DQ}) \Rightarrow ۲ - ۸/۶۳۲ = -۳/۵۱۵ i_D + ۳/۵۱۸ \times ۲/۸۴۲$$

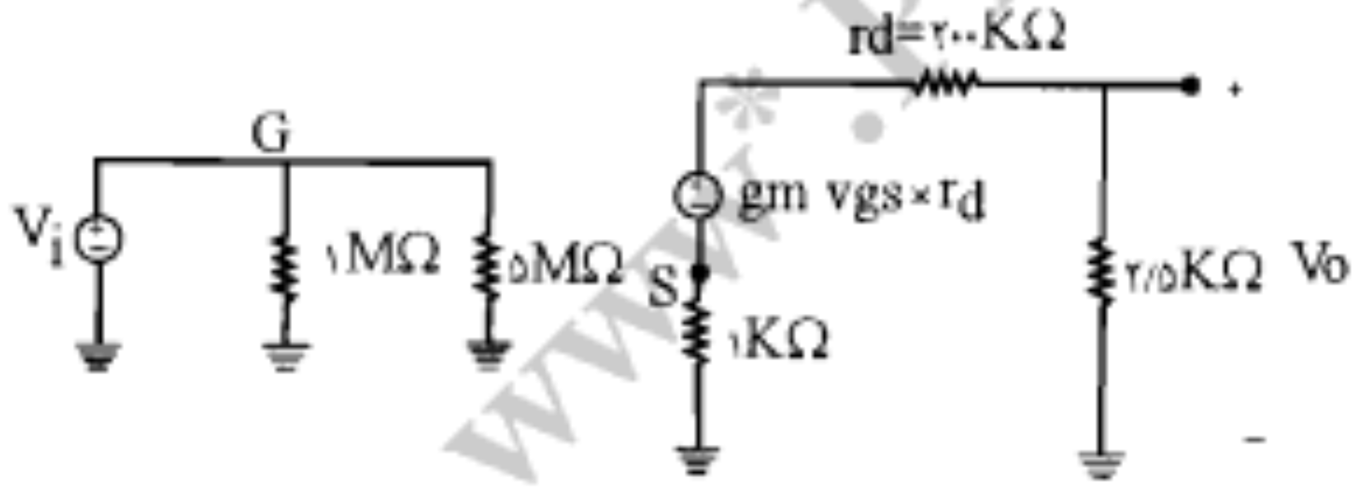
$$\Rightarrow i_D(max) = ۴/۷۳$$

و کمترین مقدار V_O چنین می‌شود:

$$V_O(min) = ۲۰ - ۲/۵ i_D(max) = ۲۰ - ۲/۵ \times ۴/۷۳ = ۸/۱۷۵V$$

$$\begin{cases} V_{O_1} = V_O(max) - V_O = ۲۰ = ۱۲/۹ = ۷/۱ \\ V_{O_2} = V_O - V_O(min) = ۱۲/۹ - ۸/۱۷۵ = ۴/۷۳ \end{cases}$$

حداکثر انحراف متقارن خروجی بدون اعوجاج $V_O(max) = ۴/۷۳$ حداکثر دامنه نوسان متقارن را کمترین مقدار به دست آمده از دو مقدار بالا مشخص می‌کند.



با استفاده از تقسیم ولتاژ: $V_O = -\frac{۲/۵ \times g_m v_{gs} r_d}{۲/۵ + ۲۰۰K\Omega + ۱K\Omega} = \frac{-۲/۵ \times ۵/۳۵ \times ۲۰۰}{۲۰۳/۵} V_{gs}$

$$\Rightarrow V_O = -۱۳۱/V_{gs}$$

(از طرفی با استفاده از تقسیم ولتاژ): $V_S = \frac{۱K\Omega \times g_m v_{gs} r_d}{۲/۵ + ۲۰۰ + ۱K\Omega} = \frac{۵/۳۵ \times ۲۰۰}{۲۰۳/۵} v_{gs} = ۵/۲۶\, v_{gs}$

از طرفی طبق مدار داریم:

$$V_i = V_g \quad , \quad V_{gs} = V_g - V_s = V_i - V_s$$

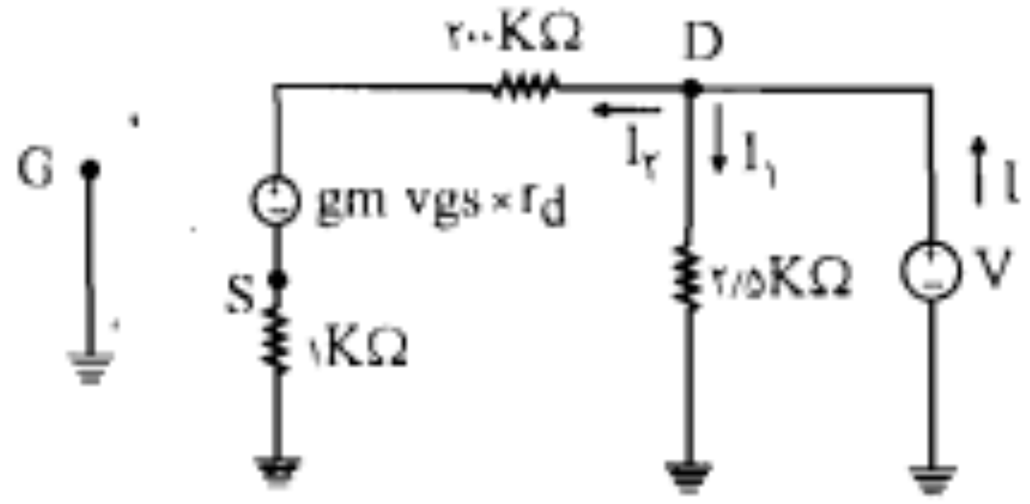
$$\Rightarrow V_{gs} + V_s = V_i \Rightarrow V_i = V_{gs} + ۵/۲۶ V_{gs} = ۶/۲۶ V_{gs}$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-۱۳/۱ V_{gs}}{۶/۲۶ V_{gs}} = -۲/۱$$

www.PnuEB.com

به دست آوردن مقاومت R_i: $R_i = ۱MΩ \| ۵MΩ = \frac{۵}{۶} MΩ = ۸۳۳ KΩ$

به دست آوردن مقاومت R_O: برای به دست آوردن مقاومت خروجی، یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت ۲/۵KΩ قرار می‌دهیم و منبع ورودی V_i را صفر در نظر می‌گیریم.



طبق مدار: $V_g = ۰$, $I = I_۱ + I_۲ = \frac{V}{۲/۵} + \frac{V + g_m v_{gs} r_d}{۲۰۰ + ۱}$ (A)

از طرفی: $V_{gs} = V_g - V_s = ۰ - ۱ \times I_۲ = -I_۲$, $I_۲ = +\frac{V + g_m V_{gs} r_d}{۲۰۰ + ۱}$

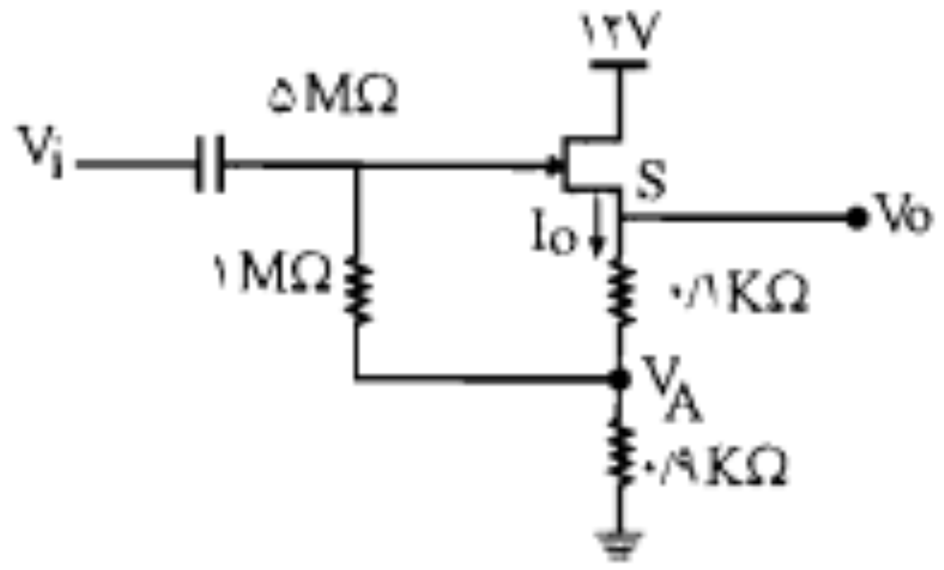
$$\Rightarrow V_{gs} = -I_۲ = -\frac{V + g_m V_{gs} r_d}{۲۰۱} = -\frac{V + ۵/۳۵ \times ۲۰۰ V_{gs}}{۲۰۱} \Rightarrow$$

$$۲۰۱ V_{gs} + ۵/۳۵ \times ۲۰۰ V_{gs} = -V \Rightarrow V_{gs} = \frac{-V}{۱۲۷۱} \quad (B)$$

با جایگذاری (B) در (A) داریم:

$$(A): I = \frac{V}{۲/۵} + \left[\frac{۵/۳۵ \times ۲۰۰ \times \frac{-V}{۱۲۷۱}}{۲۰۱} + \frac{V}{۲۰۱}\right] \Rightarrow$$

ب) $V_{GS} = V_{AS} = -۰/۱ I_D \Rightarrow I_D = -۱۰ V_{GS}$



در رابطه I_D داریم: $I_D = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^۲$

$$\Rightarrow -۱۰ V_{GS} = ۱۰\left(۱ - \frac{V_{GS}}{-۲}\right)^۲$$

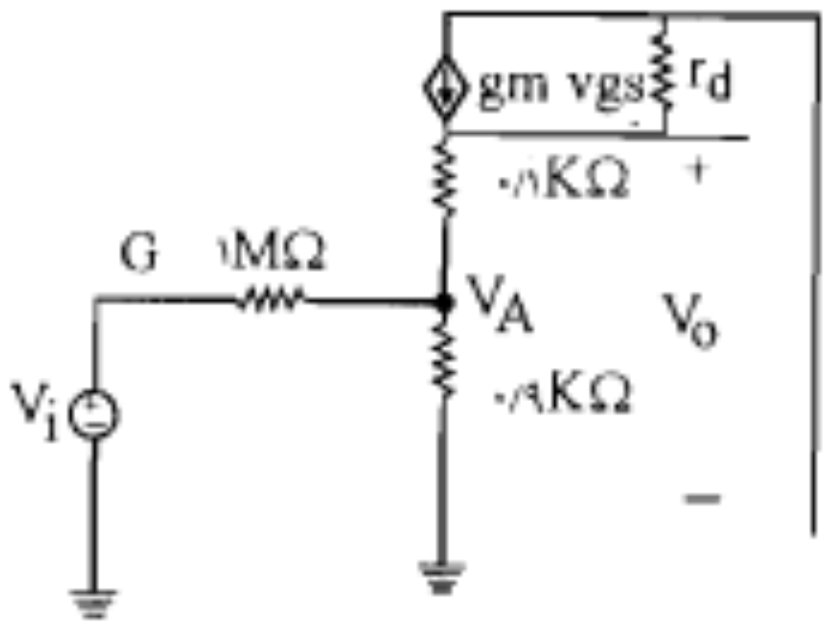
$$\Rightarrow V_{GS}^۲ + ۸ V_{GS} + ۴ = ۰ \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -۷/۴۶ \\ V_{GS} = -۰/۵۴ \end{cases}$$

$V_{GS} = -۷/۴۷$ قابل قبول نمی‌باشد چون از V_P کوچکتر است ولی $V_{GS} = -۰/۵۴$ چون از V_P بزرگتر می‌باشد قابل قبول است.

$\Rightarrow V_{GS} = -۰/۵۴$

$$g_m = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-۲ \times ۱۰}{-۲}\left(۱ - \frac{(-۰/۵۴)}{-۲}\right) = ۷/۳ \frac{mA}{V}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$\begin{cases} V_g = V_i \\ V_S = V_O \end{cases}$$

تقسیم جریان: $V_A\left(\frac{۱}{۰/۹} + \frac{۱}{۱۰۰۰} + \frac{۱}{۰/۱}\right) - \frac{۱}{۱۰۰۰} V_i - \frac{۱}{۰/۱} V_O = ۰$ (I)

از طرفی: $V_O\left(\frac{۱}{۲۰۰} + \frac{۱}{۰/۱}\right) - V_A \times \frac{۱}{۰/۱} = g_m v_{gs}$ (II) , $v_{gs} = v_g - v_s = v_i - v_O$

(I): $V_A(۱۱/۱۱۲) - ۱۰ V_O = ۰/۰۰۱ V_i$

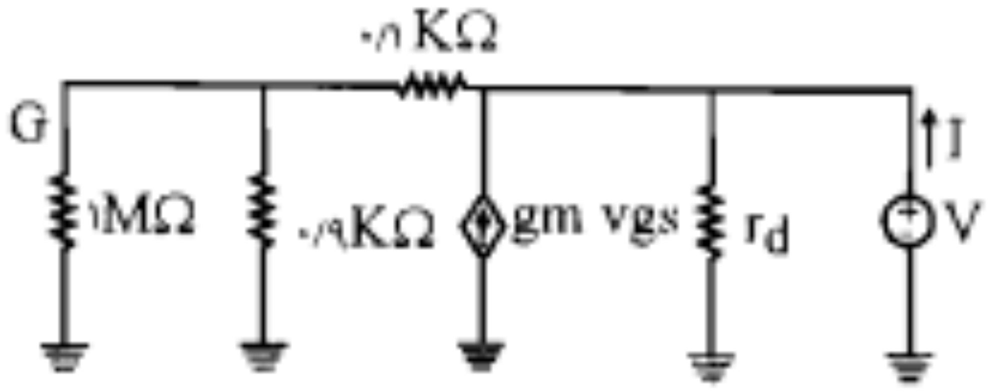
(II): $V_O(۱۰ + ۰/۰۰۵) - ۱۰ V_A = ۷/۳(V_i - V_O) \Rightarrow -۱۰ V_A + ۱۷/۳۰۵ V_O = ۷/۳ V_i$

با استفاده از این دو رابطه داریم: $V_A = ۰/۷۹ V_i$, $V_O = ۰/۸۸ V_i$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = ۰/۸۸$$

به دست آوردن R_i: $R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\left(\frac{V_g - V_A}{۱۰۰۰}\right)} = \frac{۱۰۰۰ V_i}{V_i - ۰/۷۹ V_i} = \frac{۱۰۰۰}{۰/۲۱} = ۴/۷۶ MΩ$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V در خروجی گذاشته و منبع V_i را صفر می‌کنیم.



از طرفی: $V_{gs} = V_g - V_s = ۰ - V = -V$

$$I = \frac{V}{r_d} - g_m v_{gs} + \frac{V}{۰/۱ + (۰/۹ \| ۱۰۰۰)}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{۲۰۰} - ۷/۳ \times (-V) + \frac{V}{۰/۱ + ۰/۸۹۹} \Rightarrow I = ۸/۳۰۶ \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۸/۳۰۶} \; ۱۲۰Ω$$

www.PnuEB.com

به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن:

$$I_{DQ} = -10 V_{GSQ} = -10(-0/54) = 5/4\ mA$$

$$V_{DSQ} = 12 - (0/9 + 0/1) I_{DQ} = 12 - 1 \times 5/4 = 6/6$$

مؤلفه dc خروجی: $V_O = 12 - V_{DSQ} = 12 - 6/6 = 5/4\ V$

در نقطه قطع که $i_D = 0$ می‌باشد خروجی مینیمم مقدار خود یعنی صفر را دارد. $V_O(min) = 0\ V$

V_{DS} مرز ناحیه اشباع و تریود به صورت زیر می‌باشد:

$$V_{GD} \le V_P \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le V_P \Rightarrow V_{DS} \ge -V_P + V_{GS}$$

رابطه بالا به ازای تمام مقادیر V_{GS} باید صادق باشد تا از مرز ناحیه اشباع خارج نشویم و $V_{GS} = 0$ بزرگترین مقدار ممکن سمت راست رابطه فوق را مشخص می‌کند که باید V_{DS} از این مقدار نیز بزرگتر باشد پس داریم:

$$V_{DS} \ge -V_P + 0 \Rightarrow V_{DS} \ge -V_P \ge -(-2) = 2$$

بنابراین $V_{DS} = 2\ V$ می‌تواند ماکزیمم جریان i_D و نیز ماکزیمم مقدار خروجی را مشخص کند.

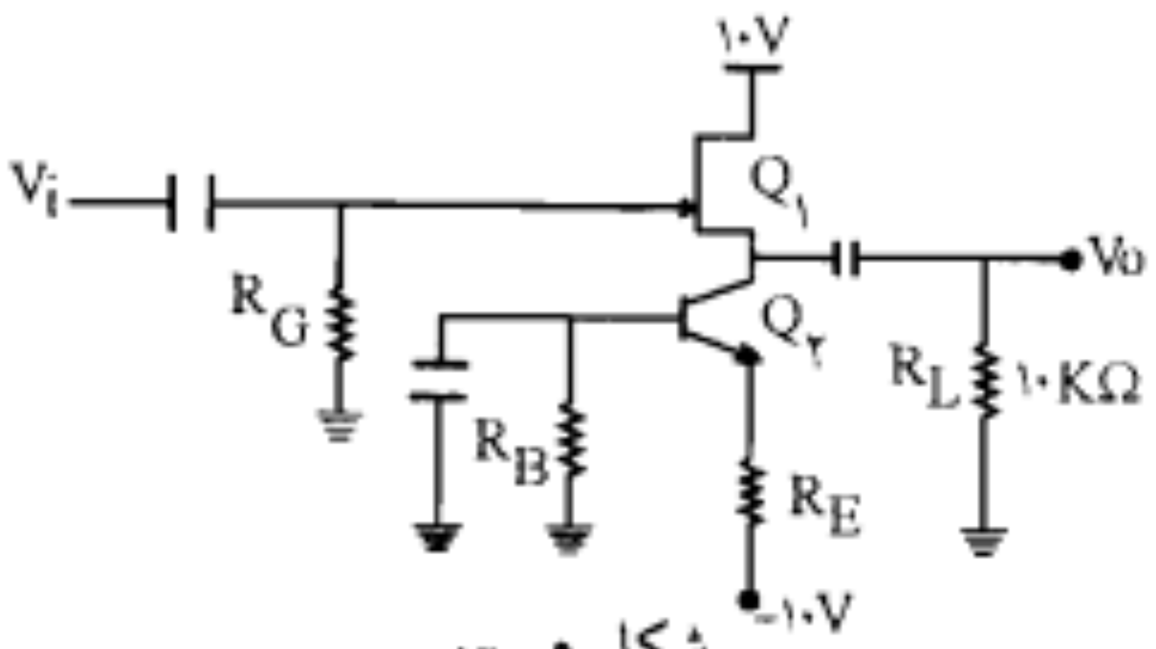
$$V_{DS} = 2V \Rightarrow V_O(max) = 12 - V_{DS}(min) = 12 - 2 = 10V$$

$$\begin{cases} V_{O_1} = V_O(max) - V_O = 10 - 5/4 = 4/6 \\ V_{O_2} = V_O - V_O(min) = 5/4 - 0 = 5/4 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_O(max) = 4/6$$

حداکثر انحراف متقارن خروجی بدون اعوجاج برابر کمترین مقدار در رابطه بالا است.

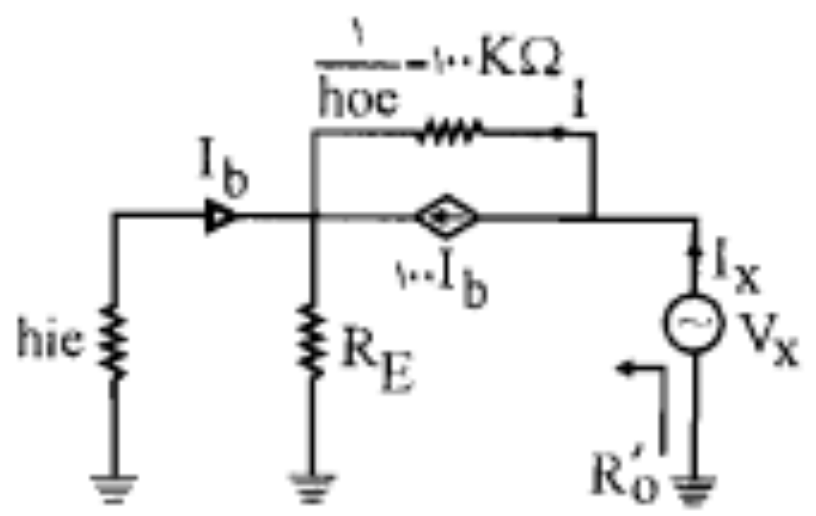
۱۲- در تقویت‌کننده شکل م-۱۲ می‌خواهیم $A_V \ge 0/97$ باشد و برای خروجی یک نوسان متقارن با دامنه ۴ ولت حول صفر ممکن باشد. همه مقادیر مجهول را محاسبه کنید. با فرض $I_{DSS} = 7/6\ mA$ و $V_P = -2/7V$ و $r_d = 100\ K\Omega$ و $h_{fe} = 100$ و $h_{oe}^{-1} = 100\ K\Omega$، اگر در این طرف مقاومت R_L مستقیماً به S وصل می‌شود چه می‌شود؟



شکل م-۱۲

☑ راه حل:

مقاومت خروجی دیده شده از کلکتور Q_2 به صورت زیر محاسبه می‌شود.



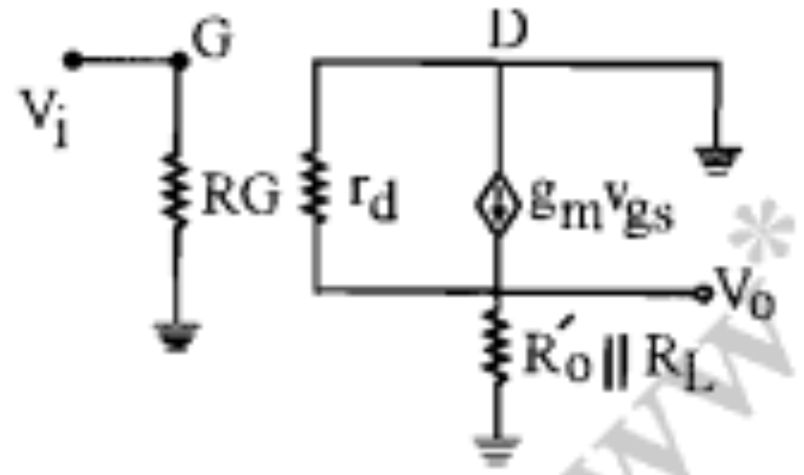
$$I_x = I + 100 I_b$$

$$I_b = -\frac{R_E}{R_E + h_{ie}} I_x \Rightarrow I = I_x - 100 I_b = \frac{h_{ie} + 101 R_E}{R_E + h_{ie}}$$

با اعمال KVL در حلقه بیرونی (شامل V_x، $\frac{1}{h_{oe}}$ و h_{ie}) خواهیم داشت:

$$V_x = 100 I - h_{ie} I_b \Rightarrow \frac{V_x}{I_x} = R'_O = \frac{100 h_{ie} + 10100 R_E + h_{ie} R_E}{R_E + h_{ie}}$$

اگر به جای طبقه Q_2، مقاومت خروجی R'_O را قرار دهیم و مدار معادل Q_1 را بکشیم مدار زیر حاصل می‌شود.



$$R \triangleq R'_O \| R_L$$

$$V_O = \frac{g_m V_{gs} \times R . r_d}{R + r_d} \qquad (1)$$

می‌دانیم که: $V_{gs} = V_g - V_s$

از طرفی $\begin{pmatrix} V_g = V_i \\ V_s = V_o \end{pmatrix}$ پس خواهیم داشت:

$$V_{gs} - V_i - V_O \qquad (2)$$

با جایگذاری رابطه (۲) در (۱) خواهیم داشت:

$$V_O = \frac{g_m (V_i - V_O) . R\, r_d}{R + r_d}$$

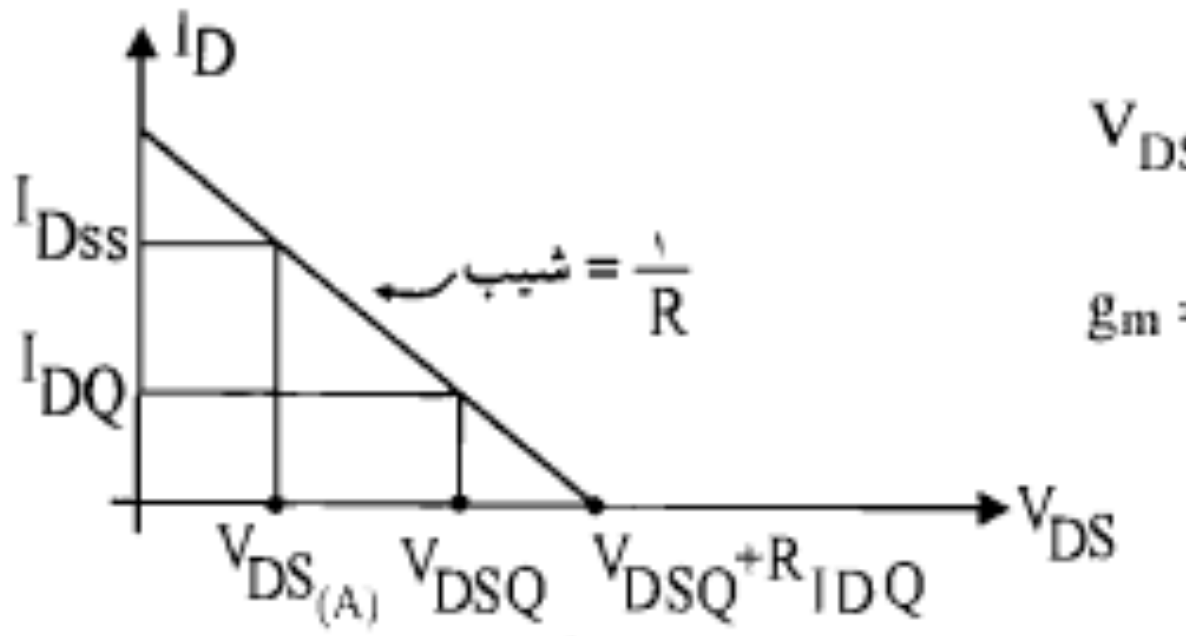
$$g_m r_d = \mu \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{\mu R}{R(1+\mu) + r_d} \ge 0/97 \Rightarrow 3 g_m \times 100 R - 97(R + 100) \ge 0$$

خط بار ac، JFET به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{ds} = -R . i_d$$

$$V_{DS} - V_{DSQ} = -R(i_D - I_{DQ})$$

www.PnuEB.com



خط بار ac

$$V_{DS}(A) = V_{DSQ} - R\,(I_{DSS} - I_{DQ})$$

$$g_m = ۲I_{DSS}\,(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P})(-\frac{۱}{V_P})$$

$$g_m = ۲I_{DSS} \times \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DSS}}}\,(-\frac{۱}{V_P}) = ۲/۰۴\sqrt{I_{DQ}} \quad (۴)$$

با جایگزینی رابطه (۲) در (۳) خواهیم داشت:

$$۳ \times ۲/۰۴\sqrt{I_{DQ}} \times ۱۰۰R - ۹۷(R + ۱۰۰) \geq ۰ \Rightarrow \sqrt{I_{DQ}} \geq \frac{۹۷(R + ۱۰۰)}{۶۱۲R}$$

اگر $I_{DQ} < \frac{I_{DSS}}{۲}$ شود در اینجا RI_{DQ} حداکثر انحراف بوده و باید ۴V باشد یعنی داریم:

$$R\,I_{DQ} = ۴ \Rightarrow I_{DQ} = \frac{۴}{R} \Rightarrow \frac{۴}{R} \geq \frac{(۹۷)^۲(R + ۱۰۰)^۲}{(۶۱۲R)^۲}$$

$$۲۵۱/۲۶ \times (\frac{۱}{R})^۲ + ۱/۰۲۵(\frac{۱}{R}) + ۰/۰۲۵ \leq ۰ \qquad (۵)$$

چند جمله‌ای عبارت (۵) همواره مثبت است و لذا این حالت به جواب نمی‌رسد.

اگر $۳/۸ = \frac{I_{DSS}}{۲} < I_{DQ}$ باشد. داریم:

$$R\,(I_{DSS} - I_{DQ}) = ۴$$

$$I_{DQ} = \frac{۷/۶R - ۴}{R} \qquad (۶)$$

با جایگزینی (۶) در معادله (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{۷/۶R - ۴}{R} \geq \frac{(۹۷)^۲(R + ۱۰۰)^۲}{(۶۱۲R)^۲}$$

$$۲۵۱/۲۶\,(\frac{۱}{R})^۲ + ۶/۰۲۵\,(\frac{۱}{R}) - ۷/۵۷ \leq ۰ \Rightarrow \frac{۱}{R} = ۰/۱۸۶ \;,\; -۰/۱۶۲$$

$$\frac{۱}{R} < ۰/۱۸۶ \Rightarrow \boxed{R > ۵/۳۸\ K\Omega}$$

با محاسبه R، I_{DQ} از رابطه (۶) محاسبه می‌شود با داشتن I_{DQ}، h_{ie} محاسبه خواهد شد:

$$h_{ie} = \frac{h_{fe}V_T}{I_C} = \frac{h_{fe}.V_T}{I_{DQ}}$$

با جایگزینی h_{ie} در رابطه R'_O خواهیم داشت:

$$R'_O \,\|\, ۱۰K = R \Rightarrow R'_O = \frac{۱۰R}{۱۰۰ - R} \qquad (۷)$$

از روی معادله (۷)، R_E محاسبه خواهد شد. (R_E باید مثبت باشد)

مثلاً اگر $R = ۱۰K$ بگیریم خواهیم داشت:

$$R_E \simeq ۱۶۵\Omega$$

$$I_{DQ} = \frac{۷/۶R - ۴}{R} = ۷/۲\ mA$$

$$g_m = ۲\sqrt{I_{DSS}.I_{DQ}}\;(-\frac{۱}{V_P}) = ۵/۴۸\,(\frac{mA}{V})$$ یا s

$$A_V = \frac{\mu R}{R(۱+\mu) + r_d} \cong ۱$$

و از حلقه V_{BE}، R_B، R_E و ۱۰- ولت خواهیم داشت:

$$R_E I_C + R_B I_B = ۱۰ - V_{BE}$$

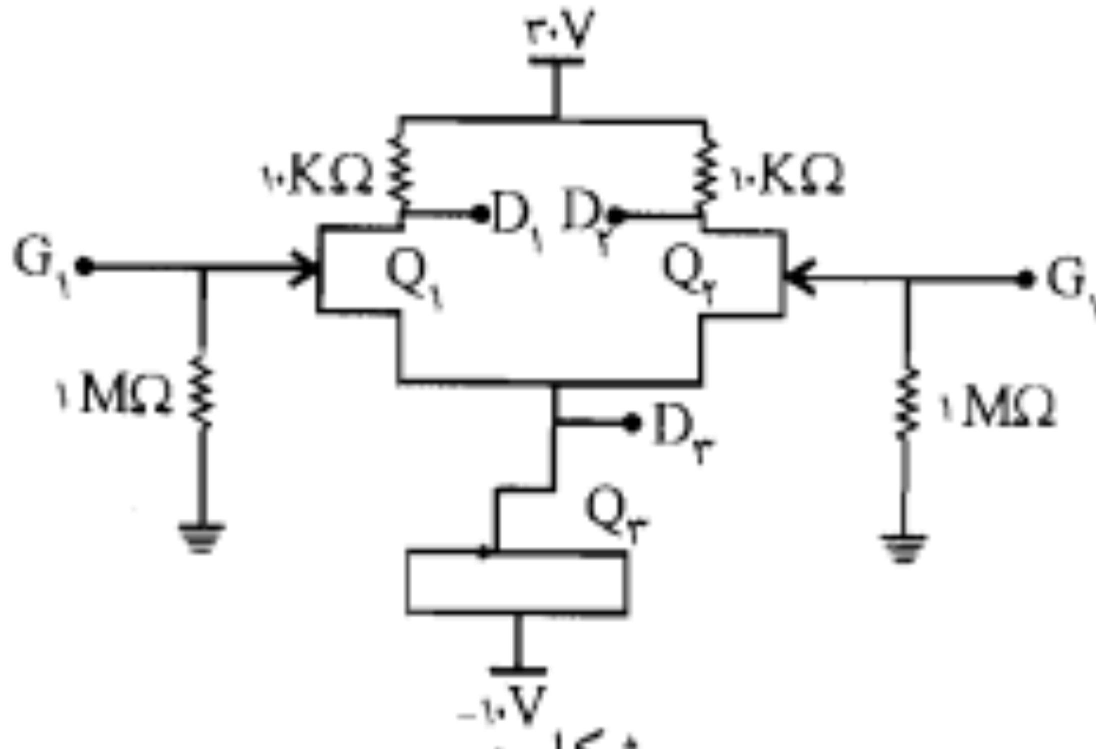
$$۰/۱۶۵ \times ۷/۲ + R_B \times \frac{۷/۲}{۱۰۰} = ۱۰ - ۰/۷ \Rightarrow \boxed{R_B = ۱۱۲/۵\ K\Omega}$$

ب) اگر R_L مستقیماً به سورس (s) متصل شود. جریان DC مربوط به کلکتور یعنی I_C با جریان I_{DQ} برابر نخواهد شد و بخشی از I_{DQ} از R_L عبور خواهد کرد و در ضمن خروجی دارای مؤلفه dc می‌شود.

۱۳ـ در مدار شکل م ـ ۱۳، همه JFETها مشابه و برای آنها $I_{DSS} = ۴\,mA$ و $V_P = -۲V$ است.

الف) ولتاژهای DC نقاط $D_۱$ و $D_۲$ و $D_۳$ را به دست آورید.

ب) در صورتی که یک سیگنال کوچک با کوپلاژ خازنی بین $G_۱$ و $G_۲$ اعمال شده و خروجی از بین نقاط $D_۱$ و $D_۲$ گرفته شود بهره ولتاژ چقدر خواهد بود؟



شکل م-۱۳

راهنمایی: $Q_۳$ به صورت یک منبع جریان ثابت عمل می‌کند. از دید سیگنال به جای آن مقاومت r_d را جایگزین نمایید.

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

الف) در $Q_۳$ چون گیت و سورس به هم متصل می‌باشند پس $V_{GS_۳} = ۰\,V$ می‌باشد لذا:

$I_{D_۳} = I_{DSS} = ۴\,mA$ و این جریان بین $Q_۱$ و $Q_۲$ تقسیم می‌شود (چون دو ترانزیستور $Q_۱$ و $Q_۲$ کاملاً مشابه می‌باشند.) پس:

$$I_{D_۱} = I_{D_۲} = \frac{۴}{۲} = ۲mA \Rightarrow V_{D_۱} = ۳۰ - ۱۰ I_{D_۱} = ۳۰ - ۱۰ \times ۲ = ۱۰\,V$$

$$\Rightarrow V_{D_۲} = ۳۰ - ۱۰ \times I_{D_۲} = ۱۰\,V \Rightarrow V_{D_۱} = V_{D_۲} = ۱۰\,V$$

از رابطه $I_{D_۱}$ داریم: $I_{D_۱} = I_{DSS}(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{V_{P_۱}})^۲ \Rightarrow ۲ = ۴(۱ - \frac{V_{GS_۱}}{-۲})^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_۱} = -۳/۴۱ \\ V_{GS_۱} = -۰/۵۹ \end{cases}$

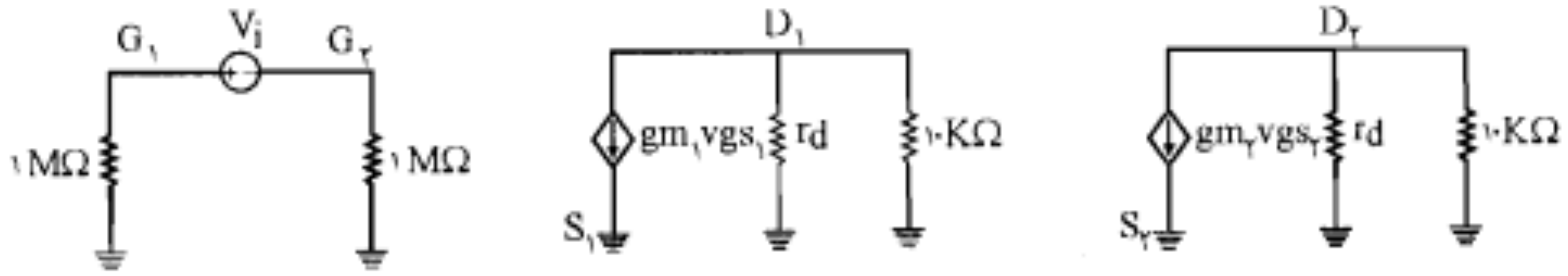
$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS_۱} = ۳/۴۱ < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{GS_۱} = -۰/۵۹ > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

($V_{G_۲} = V_{G_۱} = ۰$ می‌باشند چون توسط یک مقاومت ۱MΩ به زمین وصل شده‌اند.)

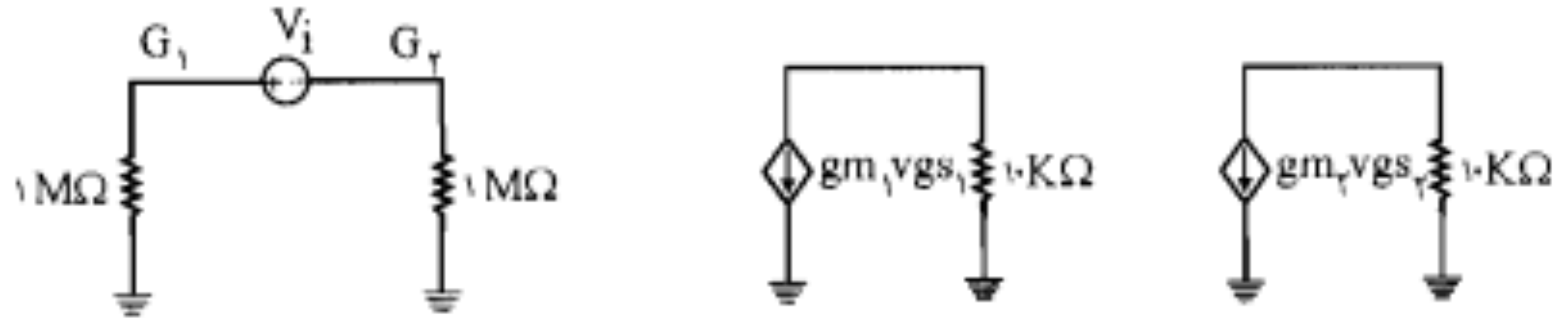
$$\Rightarrow V_{G_۱} - V_{S_۱} = -۰/۵۹$$

$$\Rightarrow ۰ - V_{S_۱} = -۰/۵۹ \Rightarrow V_{G_۱} = ۰/۵۹ \Rightarrow V_{D_۳} = V_{S_۱} = ۰/۵۹$$

ب) مدار معادل $Q_۳$ یک منبع جریان ثابت با مقدار ۴mA و یک مقاومت r_d در دو سر آن می‌باشد. مدار معادل کل به صورت شکل صفحه بعد می‌باشد:



اگر r_d را بزرگ در نظر بگیریم r_d در مقابل مقاومت ۱۰KΩ حذف می‌شود:



$$g_m = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}(۱ - \frac{V_{GS}}{V_P}) = \frac{-۲\times ۴}{-۲}(۱ - \frac{-۰/۵۹}{-۲}) = ۲/۸۲$$

$$\begin{cases} V_{g_۱} = V_i \times \frac{۱}{۱+۱} = \frac{V_i}{۲} \\ V_{g_۲} = -V_i \times \frac{۱}{۱+۱} = -\frac{V_i}{۲} \end{cases}$$

از طرفی: $g_m V_{gs_۱} = -g_m V_{gs_۲} \Rightarrow (V_{g_۱} - V_{s_۱}) = -(V_{gs_۲} - V_{s_۲})$

$$\Rightarrow V_{g_۱} = V_{g_۲}$$

$$V_{D_۲} = -g_{m_۲} V_{gs_۲} \times ۱۰ = -۲/۸۲ \times (\frac{V_i}{۲}) \times ۱۰ = ۱۴/۱ Vi$$

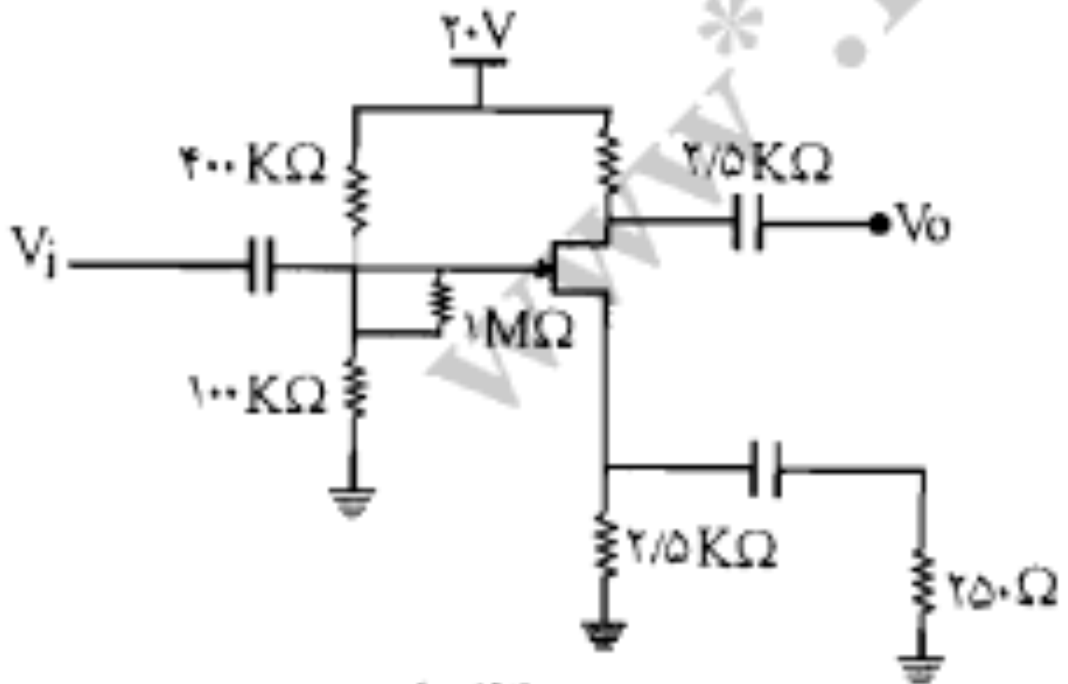
$$V_{D_۱} = -g_{m_۱} V_{gs_۱} \times ۱۰ = -۲/۸۲ \times (\frac{V_i}{۲}) \times ۱۰ = -۱۴/۱ Vi$$

$$V_O = V_{D_۱} - V_{D_۲} = -۱۴/۱ V_i - (+۱۴/۱ V_i)$$

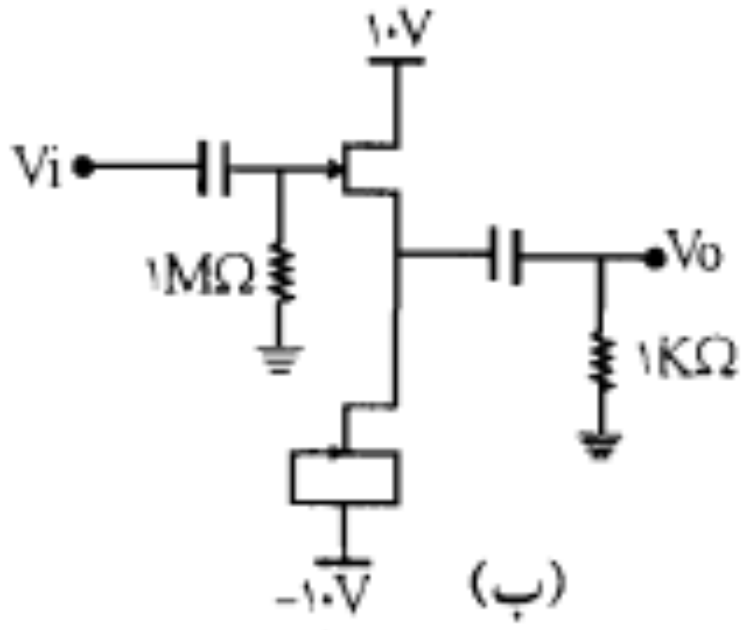
$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -۲۸/۲$$

(خروجی از بین نقاط $D_۱$ و $D_۲$ گرفته می‌شود.)

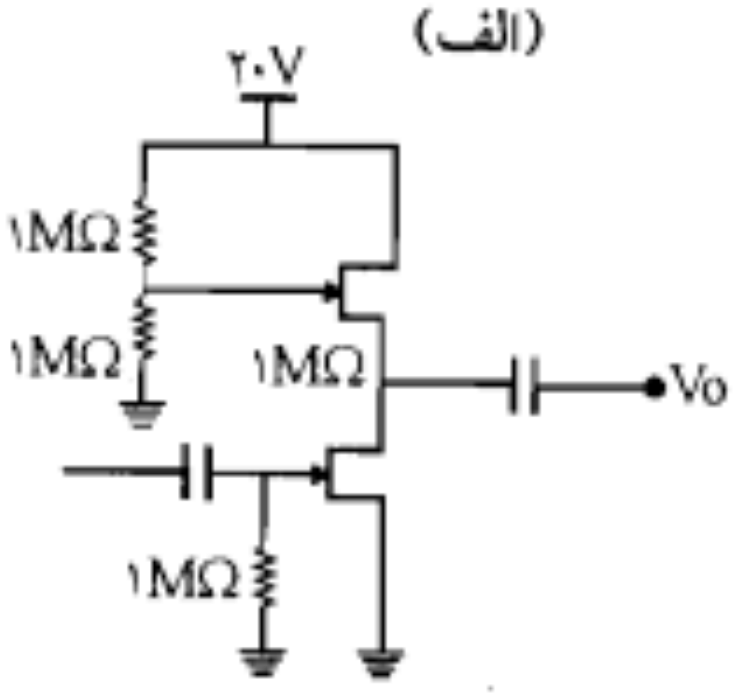
۱۴ ـ در مدارهای شکل م ـ ۱۴ فرض کنید برای همه JFETها، $I_{DSS} = ۸mA$ و $|V_P| = ۲V$ است. A_V را محاسبه کنید.



(الف)



(ب)



(ج)

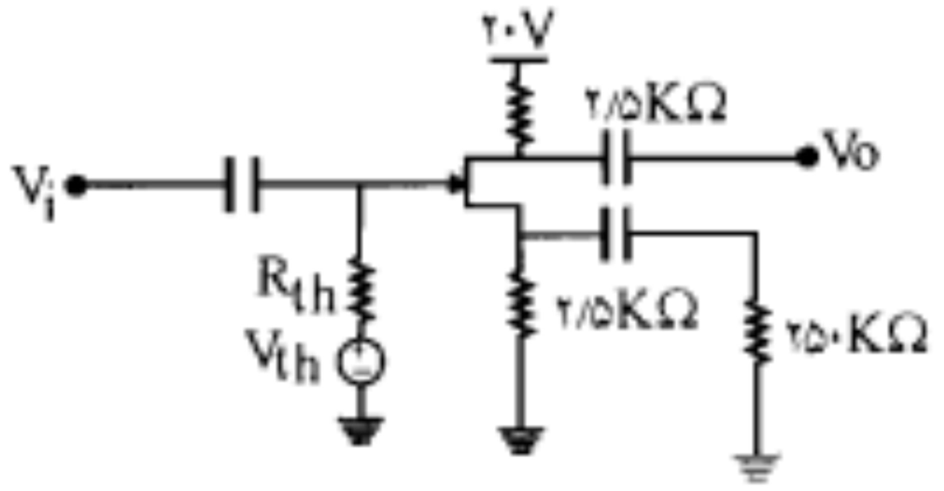
www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

الف) مدار معادل تونن را در گیت اجرا می‌کنیم:

$$\begin{cases} R_{th} = ۱M\Omega + \frac{۱۰۰\times ۴۰۰}{۱۰۰+۴۰۰} = ۱۰۸۰K\Omega \\ V_{th} = ۲۰\times \frac{۱۰۰}{۴۰+۱۰۰} = ۴V \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



چون JFET از نوع N کانال می‌باشد، V_P منفی می‌باشد.

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{th} - ۲/۵I_D = ۴ - ۲/۵I_D$$

با توجه به رابطه I_D داریم: $I_D = I_{DSS}\left(۱-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^۲ = ۸\left(۱-\frac{۴-۲/۵I_D}{-۲}\right)^۲$

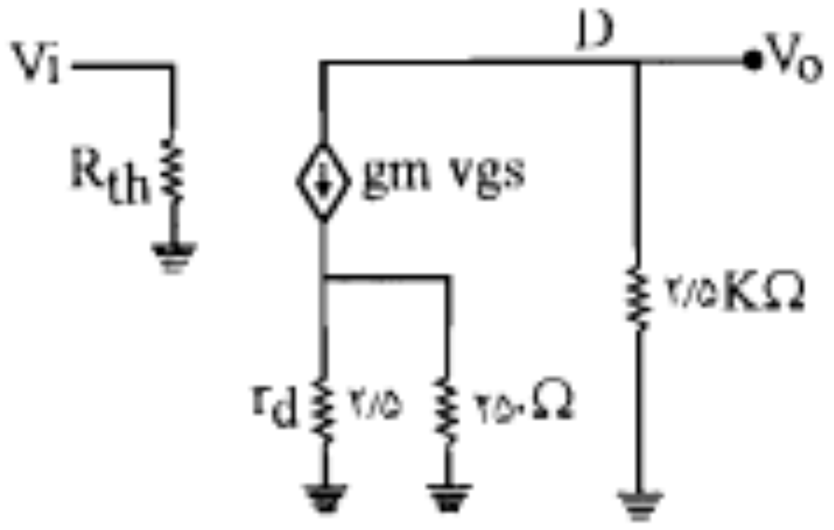
$$\Rightarrow ۲۵I_D^۲ - ۱۲۲I_D + ۱۴۴ = ۰$$

با حل این معادله درجه (۲) مقادیر زیر برای I_D به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_D = ۲ \Rightarrow V_{GS} = ۴ - ۲/۵\times ۲ = -۱ > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \\ I_D = ۲/۸۸ \Rightarrow V_{GS} = ۴ - ۲/۵\times ۲/۸۸ = -۳/۲ < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases}$$

$$g_m = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱-\frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-۲\times ۸}{-۲}\left(۱-\frac{-۱}{-۲}\right) = ۴\frac{mA}{V}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$V_O = -g_m V_{gs}\times ۲/۵ = -۴\times ۲/۵\times V_{gs} = -۱۰V_{gs} \quad (I)$$

$$V_{gs} = V_g - V_s = V_i - (۲/۵K\Omega \parallel ۰/۲۴K\Omega)\times g_m V_{gs}$$

$$\Rightarrow V_i = V_{gs} + ۰/۳۲\times ۴V_{gs} = V_{gs}(۱+۰/۹۲) = ۱/۹۲V_{gs} \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

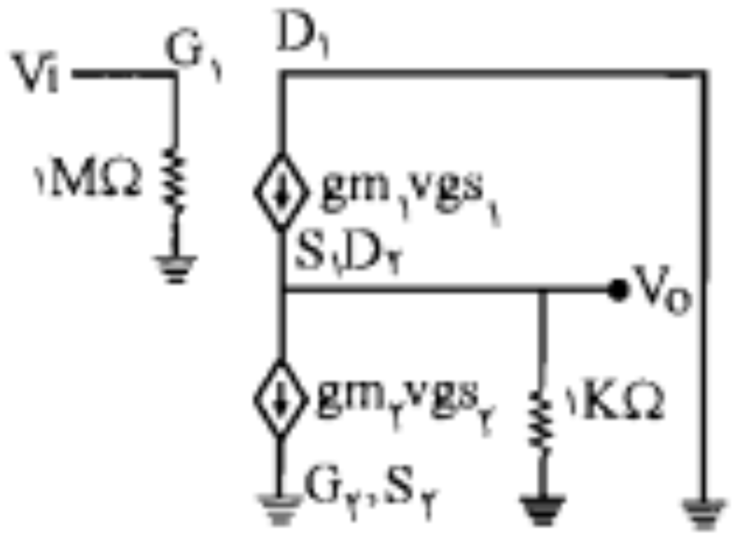
$$(I) \Rightarrow V_O = -۱۰\times \frac{V_i}{۱/۹۲} \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-۱۰}{۱/۹۲} = -۵/۲$$

ب) در مدار شکل ب چون گیت و سورس $Q_۲$ به هم وصل می‌باشند پس $V_{GS_۲} = ۰$ می‌باشد بنابراین:

$$I_{D_۱} = I_{D_۲} = I_{DSS}$$

$$g_{m_۱} = g_{m_۲} = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱-\frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-۲\times ۸}{-۲}(۱-۰) = ۸\frac{mA}{V}$$

پس مدار معادل مطابق شکل زیر می‌باشد:



$$V_{gs_۲} = ۰ \Rightarrow g_{m_۲}V_{gs_۲} = ۰ \Rightarrow V_O = g_{m_۱}V_{gs_۱}\times ۱ = ۸V_{gs_۱}$$

$$V_{gs_۱} = V_{g_۱} - V_{s_۱} = V_i - V_O = V_i - ۸V_{gs_۱} \Rightarrow V_i = ۹V_{gs_۱}$$

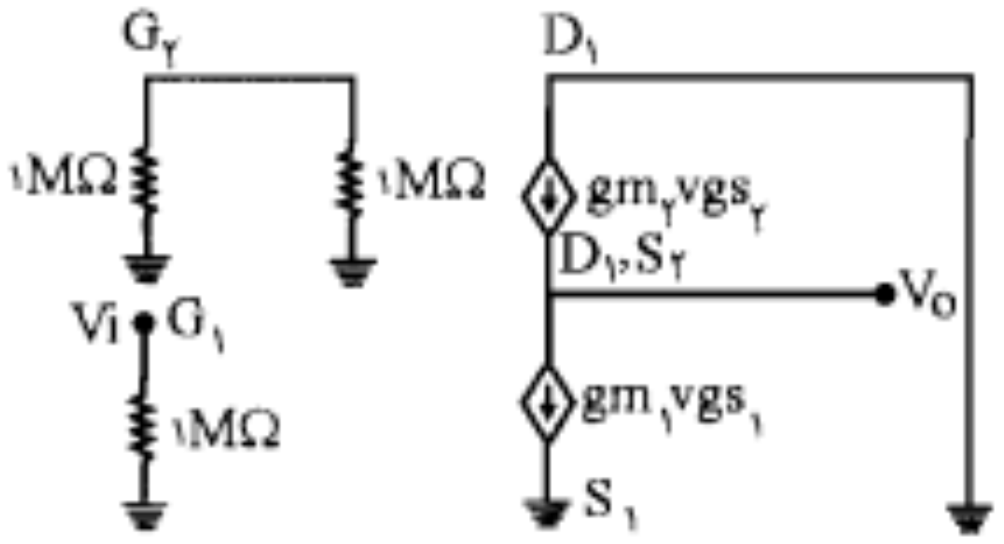
$$\Rightarrow V_{AV} = \frac{V_O}{V_i} = \frac{۸V_{gs_۱}}{۹V_{gs_۱}} = ۰/۸۹$$

ج) در مدار شکل ج داریم: (در JFET پایینی $Q_۱$):

$$V_{GS_۱} = V_{G_۱} - V_{S_۱} = ۰ - ۰ = ۰ \Rightarrow I_{D_۱} = I_{DSS}$$

از طرفی: $I_{D_۱} = I_{D_۲} = I_{DSS} = ۸mA \Rightarrow g_{m_۱} = g_{m_۲} = \frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱-\frac{V_{GS}}{V_P}\right) = ۸\frac{mA}{V}$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



www.PnuEB.com

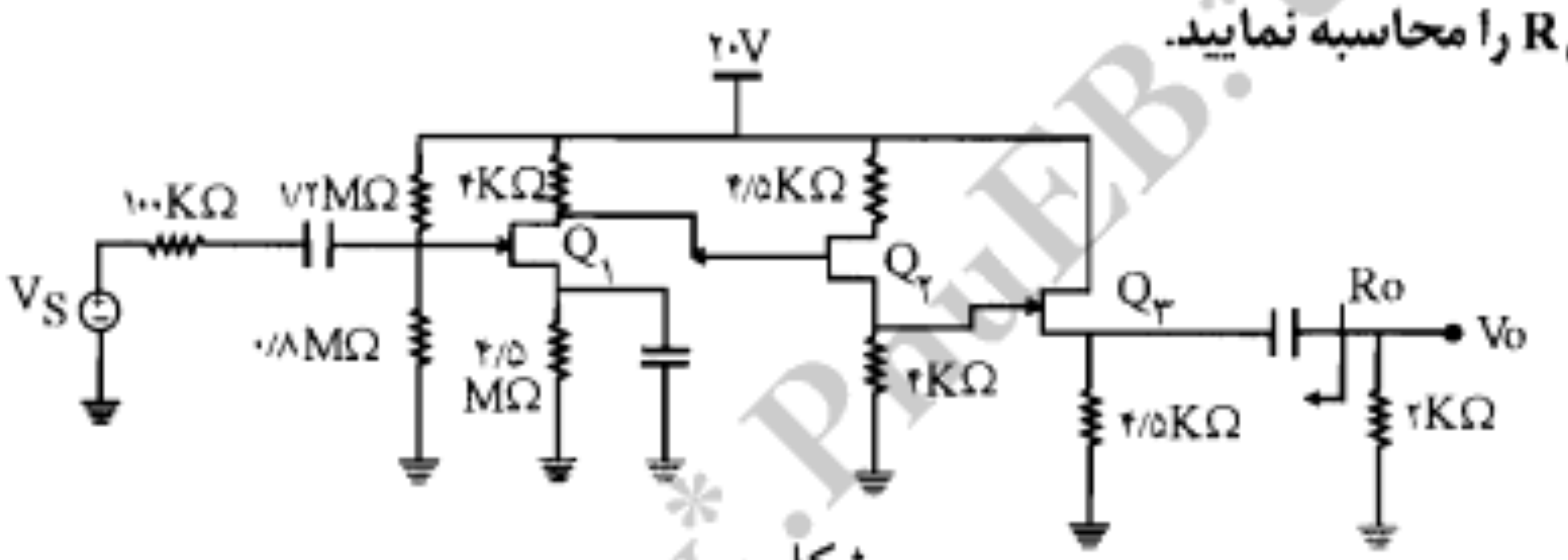
$$g_{m_1}V_{gs_1} = 8(V_{g_1} - V_{s_1}) = 8(V_i - 0) = 8V_i \quad \Leftarrow \begin{cases} V_{g_1} = V_i \\ V_{s_1} = 0 \end{cases}$$

$$g_{m_2}V_{gs_2} = 8(V_{g_2} - V_{s_2}) = 8(0 - V_O) = -8V_O \quad \Leftarrow \begin{cases} V_{g_2} = 0 \\ V_{s_2} = V_O \end{cases}$$

از طرفی دو منبع جریان $g_{m_1}V_{g_{s_1}}$ و $g_{m_2}V_{g_{s_2}}$ برابر می‌باشند پس:

$$g_{m_1}V_{g_{s_1}} = g_{m_2}V_{g_{s_2}} \Rightarrow 8V_i = -8V_O \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -1$$

۱۵ـ برای همه JFETهای مدار شکل م ـ ۱۵، $I_{DSS} = 4\,mA$ و $|V_P| = 2V$ است. برای این مدار A_{V_S}، R_i و R_O را محاسبه نمایید.



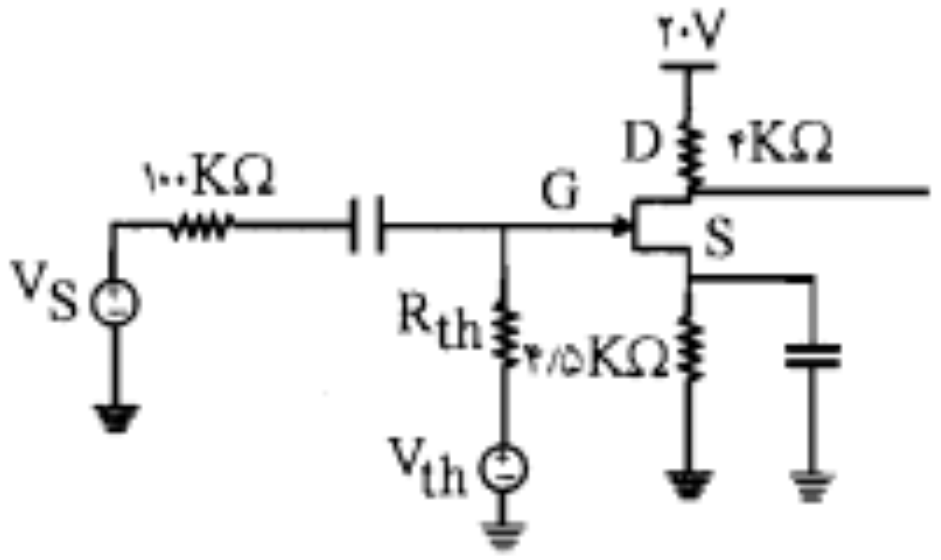
شکل م-۱۵

☑ **راه حل:**

مدار معادل تونن در ورودی Q_1 (JFET) اول را می‌نویسیم:

$$\begin{cases} R_{th} = 1.2M\Omega \,\|\, 0.8m\Omega = \dfrac{1.2 \times 0.8}{1.2 + 0.8} = 0.48M\Omega \\ V_{th} = \dfrac{20 \times 0.8}{1.2 + 0.8} = 8V \end{cases}$$

پس مدار معادل تا قبل از Q_2 به شکل زیر در می‌آید:



($|V_P| = +2V$ می‌باشد و چون در JFET کانال N، $V_P < 0$ می‌باشد پس $V_P = -2V$ در نظر گرفته می‌شود.)

$$V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1}$$

$$\text{KVL}: V_{GS_1} = 8 - 4.5I_{D_1}$$

از طرفی: $I_{D_1} = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P})^2 = 4(1 - \frac{8 - 4.5I_{D_1}}{-2})^2 \Rightarrow$

$$I_{D_1} = (2 + 8 - 4.5I_{D_1})^2 = (10 - 4.5I_{D_1})^2$$

با حل این معادله درجه (۲) مقادیر زیر برای I_{D_1} به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_1} = 2.58mA \Rightarrow V_{GS_1} = 8 - 4.5 \times 2.58 = -3.61V < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ I_{D_1} = 1.915mA \Rightarrow V_{GS_1} = 8 - 4.5 \times 1.915 = -0.62V > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

$$\Rightarrow g_{m_1} = \frac{-2I_{DSS}}{V_P}(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}) = \frac{-2 \times 4}{-2}(1 - \frac{(-0.62)}{-2}) = 2.76\frac{mA}{V}$$

حال در Q_2 داریم:

$$V_{GS_2} = V_{G_2} - V_{S_2}$$

$$\begin{cases} V_{S_2} = 20 - 4.5I_{D_2} \\ V_{G_2} = 20 - 4I_{D_1} = 20 - 4I_{D_1} = 20 - 4 \times 1.915 = 12.34V \end{cases}$$

$$V_{GS_2} = 12.34 - (20 - 4.5I_{D_2}) = 4.5I_{D_2} - 7.66$$

از طرفی: $I_{D_2} = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS_2}}{V_P})^2 = 4(1 - \frac{4.5I_{D_2} - 7.66}{+2})^2$

چون Q_2 از نوع کانال P می‌باشد پس V_P عدد مثبت می‌باشد. ($V_P = 2V$)

$$\Rightarrow I_{D_2} = (2 + 7.66 - 4.5I_{D_2})^2 \Rightarrow 20.25I_{D_2}^2 - 87.94I_D + 93.32 = 0$$

با حل این معادله درجه (۲)، مقادیر زیر برای I_{D_2} به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_2} = 2.497\,mA \\ I_{D_2} = 1.845\,mA \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS_2} = 4.5 \times 2.497 - 7.66 = 3.58 > V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{GS_2} = 4.5 \times 1.845 - 7.66 = 0.643 < V_P \Rightarrow & \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

www.PnuEB.com

$$g_{m_۲}=\frac{۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱-\frac{V_{GS_۲}}{V_P}\right)=\frac{۲\times ۴}{۲}\left(۱-\frac{۰/۶۴۳}{۲}\right)=۲/۷۱۴\,\frac{mA}{V}$$

در $Q_۳$ داریم:

$$V_{GS_۳}=V_{G_۳}-V_{S_۳}$$

$$\begin{cases}V_{G_۳}=۴I_{D_۲}=۴\times ۱/۸۴۵=۷/۳۸\,V\\ V_{S_۳}=۴/۵I_{D_۳}\end{cases}\Rightarrow V_{GS_۳}=۷/۳۸-۴/۵I_{D_۳}$$

$Q_۳$ از نوع کانال N می‌باشد پس $V_P=-۲V$ می‌باشد.

از طرفی: $I_{D_۳}=I_{DSS}\left(۱-\frac{V_{GS_۳}}{V_P}\right)^۲=۴\left(۱-\frac{۷/۳۸-۴/۵I_{D_۳}}{-۲}\right)^۲$

$$\Rightarrow ۲۰/۲۵I_{D_۳}^۲-۸۵/۴۲I_{D_۳}+۸۷/۹۸=۰$$

با حل این معادله درجه (۲) مقادیر زیر برای $I_{D_۳}$ به دست می‌آید:

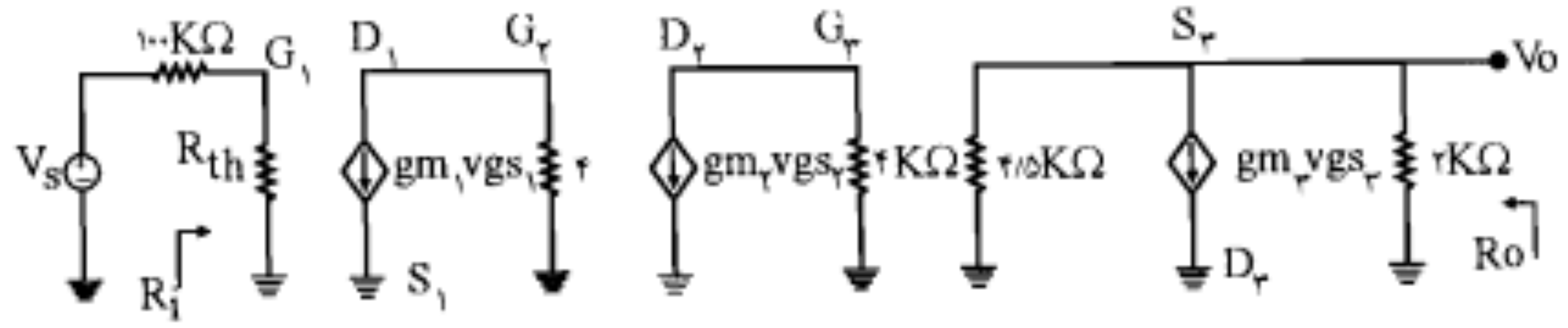
قابل قبول نمی‌باشد

$$\Rightarrow\begin{cases}I_{D_۳}=۲/۴۳\Rightarrow V_{GS_۳}=۷/۳۸-۴/۵I_{D_۳}=۷/۳۸-۴/۵\times ۲/۴۳=-۳/۵۵۵<V_P\Rightarrow\uparrow\\ I_{D_۳}=۱/۷۸۷\Rightarrow V_{GS_۳}=۷/۳۸-۴/۵\times ۱/۷۸۷=-۰/۶۶>V_P\Rightarrow\end{cases}$$

قابل قبول می‌باشد

$$\Rightarrow g_{m_۳}=\frac{-۲I_{DSS}}{V_P}\left(۱-\frac{V_{GS_۳}}{V_P}\right)^۲=\frac{-۲\times ۴}{-۲}\left(۱-\frac{-۰/۶۶}{-۲}\right)=۲/۶۸\,\frac{mA}{V}$$

حال مدار معادل شکل م ـ ۱۵ را رسم می‌کنیم:



طبق مدار معادل داریم:

$$V_O=V_{S_۳}\qquad (I)$$

$$V_{S_۳}=g_{m_۳}V_{gs_۳}\times(۲K\Omega\,\|\,۴/۵K\Omega)=۲/۶۸\times(V_{g_۳}-V_{s_۳})\times\left(\frac{۲\times ۴/۵}{۲+۴/۵}\right)$$

$$\Rightarrow V_{S_۳}=۳/۷۱\,(V_{g_۳}-V_{s_۳})\Rightarrow ۴/۷۱V_{s_۳}=۳/۷۱V_{g_۳}\Rightarrow V_{s_۳}=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}V_{g_۳}\ (II)$$

از طرفی: $V_{g_۳}=-g_{m_۲}V_{gs_۲}\times ۴K\Omega=-۲/۷۱\times ۴\times(V_{g_۲}-V_{s_۲})=-۱۰/۸۴\times V_{g_۲}\quad (III)$

از طرفی: $V_{g_۲}=-g_{m_۱}V_{gs_۱}\times ۴K\Omega=-۲/۷۶\times ۴\times(V_{g_۱}-V_{S_۱})=-۱۱/۰۴\times V_{g_۱}\quad (IV)$

از طرفی: $V_{gs_۱}=V_{g_۱}-V_{s_۱}=V_{g_۱}-۰=V_{g_۱}$

با استفاده از تقسیم ولتاژ: $V_{g_۱}=V_s\times\frac{R_{th}}{R_{th}+۱۰۰}=V_S\times\frac{۰/۴۸\times ۱۰^۳}{۰/۴۸\times ۱۰^۳+۱۰۰}=۰/۸۳\,V_s\quad (V)$

با جایگذاری روابط (V) و (IV) و (III) و (II) در رابطه (I) داریم:

$$V_O=V_{S_۳}=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}V_{g_۳}=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}\times(-۱۰/۸۴)V_{g_۲}=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}\times(-۱۰/۸۴)\times(-۱۱/۰۴)V_{g_۱}$$

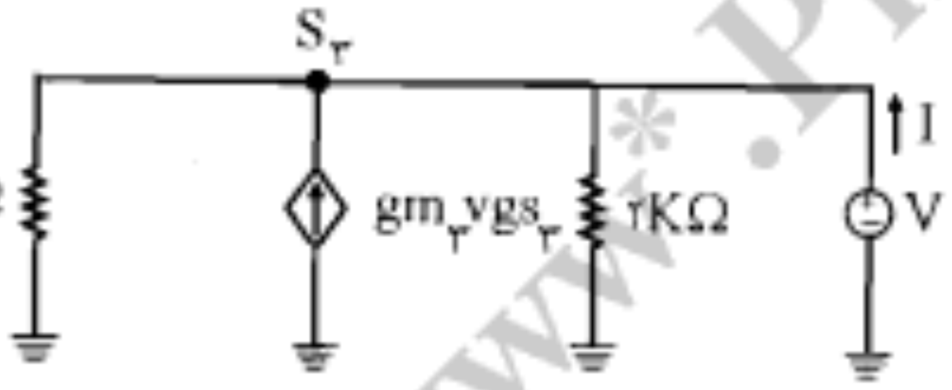
$$=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}\times(-۱۰/۸۴)\times(-۱۱/۰۴)\times ۰/۸۳\,V_S$$

$$\Rightarrow A_V=\frac{V_O}{V_i}=\frac{V_O}{V_s}=\frac{۳/۷۱}{۴/۷۱}\times ۱۰/۸۴\times ۱۱/۰۴\times ۰/۸۳=۷۸/۲۴$$

$$R_i=۰/۴۸M\Omega=۴۸۰\,K\Omega$$

با توجه به مدار معادل داریم:

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم.



$$V_{S_۳}=V$$

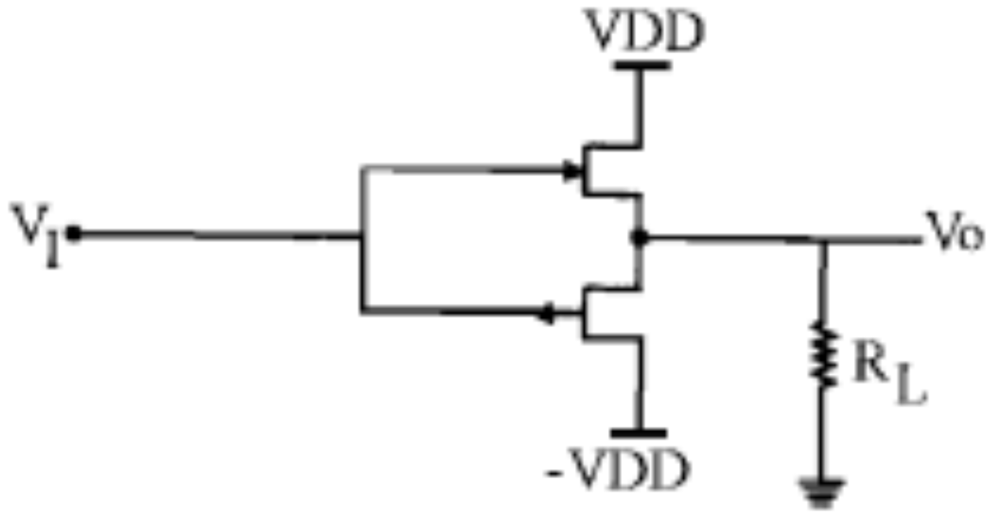
$$g_{m_۳}V_{gs_۳}=g_{m_۳}(V_{g_۳}-V_{s_۳})=g_{m_۳}\times(۰-V_{s_۳})=-g_{m_۳}V$$

$$I=-g_{m_۳}V_{gs_۳}+\frac{V}{۴/۵}+\frac{V}{۲}=-(-g_{m_۳}V)+V\left(\frac{۱}{۴/۵}+\frac{۱}{۲}\right)$$

$$=V\left(g_{m_۳}+\frac{۱}{۴/۵}+\frac{۱}{۲}\right)=\left(۲/۶۸+\frac{۱}{۴/۵}+\frac{۱}{۲}\right)$$

$$\Rightarrow R_O=\frac{V}{I}=\frac{۱}{\left(۲/۶۸+\frac{۱}{۴/۵}+\frac{۱}{۲}\right)}=۰/۲۹۴\,K\Omega\Rightarrow R_O=۲۹۴\Omega$$

۱۶ ـ یک سورس فالوئر مکمل از به هم پیوستن JFET کانال N و یک JFET کانال P مطابق شکل م ـ ۱۶ حاصل می‌شود (JFETها مشابه هستند). به ازای $V_I=۰$ چه جریان ثابتی از JFET ها عبور می‌کند؟ مقاومت خروجی سورس فالوئر چقدر است؟



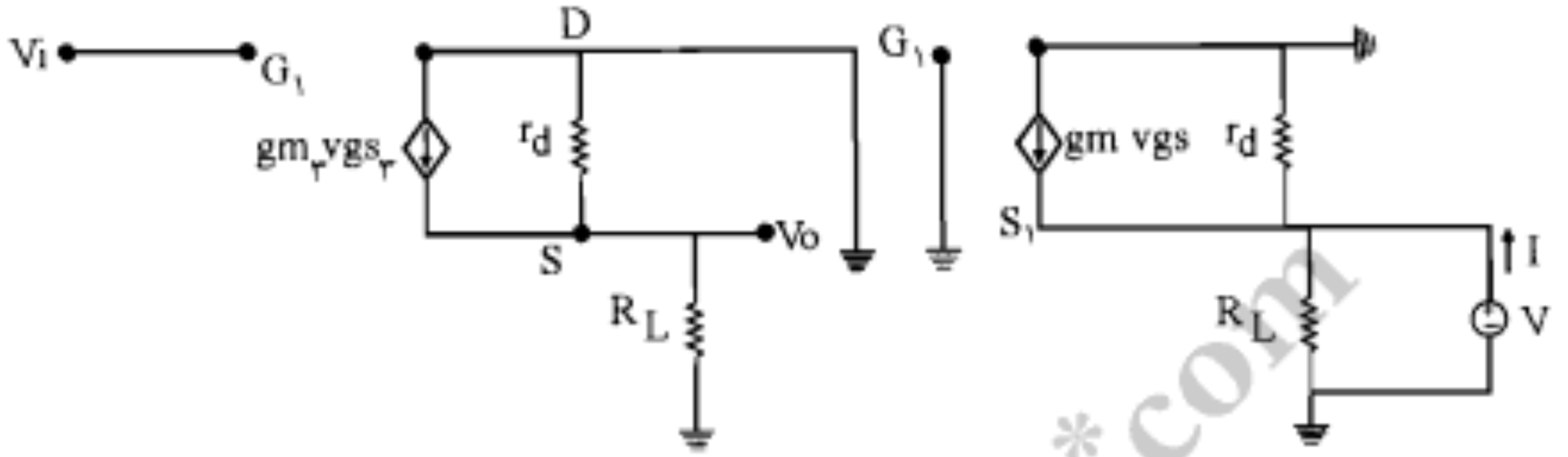
شکل م ـ ۱۶

☑ **راه حل:**

به ازای $V_i = 0$، به دلیل متقارن بودن مدار و مشابه بودن JFET ها، V_O برای هر دو ترانزیستور صفر می‌باشد.

$V_O = 0 \Rightarrow V_{GS_1} = V_{GS_2} = 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_{D_2}$

مدار معادل:



برای محاسبه مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ در خروجی در دو سر R_L قرار می‌دهیم و V_i را صفر می‌کنیم.

$V_{gs_1} = V_{g_1} - V_{s_1} = 0 - V = -V$

فرض $g_{m_1} = g_{m_2} = g_m \Rightarrow I = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m V_{gs} = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m(-V)$

$= (\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_d} + g_m) \times V \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_d} + g_m)}$

۱۷ـ یک ترانزیستور NMOS نوع تهی با $V_P = -1V$ و $V_{GS} = 1V$ و $I_{DSS} = 1mA$ کار می‌کند. حداقل مقدار V_{DS}، برای اینکه این ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند چقدر است؟ مقدار I_D چقدر می‌شود؟

☑ **راه حل:**

در ناحیه اشباع: $V_{GD} \le -|V_P| \Rightarrow V_{GD} \le -1 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le -1$

$\Rightarrow 1 - V_{DS} \le -1 \Rightarrow V_{DS} \ge 2V$

حداقل مقدار V_{DS} برابر ۲V به دست آمد.

$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2 = 1 \times (1 - \frac{1}{-1})^2 = 4mA$

۱۸ـ یک ترانزیستور PMOS نوع تهی با $V_P = 2V$ و $I_{DSS} = 8mA$ در $V_{GS} = -1V$ کار می‌کند. حداقل مقدار V_{DS} برای اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند چقدر است؟ مقدار I_D چقدر می‌شود؟

در ناحیه اشباع (PMOS): $V_{DG} < -|V_P|$ ؛ $V_{GD} \ge V_P \Rightarrow V_{GD} \ge 2 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \ge 2$

$\Rightarrow -1 - V_{DS} \ge 2 \Rightarrow V_{DS} \le -3V$

حداقل مقدار $V_{DS} = -3V$ می‌باشد (حداقل قدر مطلق V_{DS})

$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P})^2 = 8(1 - \frac{-1}{2})^2 = 18\ mA$

۱۹ـ یک ترانزیستور NMOS نوع تهی با $V_P = -0/5V$ و $I_{DSS} = 0/5mA$ در $V_{GS} = 10V$ کار می‌کند. جریان درین در ناحیه اشباع چقدر خواهد بود؟ چه ولتاژ درین ـ سورس مورد نیاز است؟

☑ **راه حل:**

$I_D = I_{DSS}(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}) = 0/5(1 - \frac{10}{-0/5})^2 = 22/05\ mA$

به دست آوردن ولتاژ V_{DS}:

در ناحیه اشباع NOMS $V_{GD} \le -|V_P| \Rightarrow V_{GD} \le -0/5 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le -0/5$

$\Rightarrow 10 - V_{DS} \le -0/5 \Rightarrow V_{DS} \ge 10/5V$

۲۰ـ یک ترانزیستور NMOS نوع ارتقایی با $V_T = 2V$ قرار است با $V_{GS} = 4V$ در ناحیه اشباع کار کند. به ازای چه V_{DS} حداقلی این حالت امکان دارد؟

نوع ارتقایی در ناحیه اشباع NMOS: $V_{GD} \le V_T \Rightarrow V_{GD} \le 2V \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \le 2V$

$\Rightarrow 4 - V_{DS} \le 2V \Rightarrow V_{DS} \ge 2V$

حداقل مقدار V_{DS} برابر ۲V می‌باشد.

۲۱ـ یک ترانزیستور PMOS نوع ارتقایی با $V_T = -1V$ به عنوان یک دیود مورد استفاده قرار می‌گیرد (گیت درین آن به هم وصل شده است). به ازای ولتاژ ۲V این دیود جریان ۱۰ mA را از خود عبور می‌دهد. افت ولتاژ دیود در جریان‌های ۱mA و ۰/۱mA چقدر است؟

☑ **راه حل:**

طبق فرض مسئله گیت و درین به هم متصل می‌باشند پس $V_{GD} = 0$ و در نتیجه $V_{GS} = V_{DS}$

www.PnuEB.com

می‌باشد و چون $V_T = -1V$ است و $V_{GD} < V_T$ می‌باشد پس ترانزیستور PMOS در ناحیه اشباع کار می‌کند و در ناحیه اشباع رابطه I_D به صورت زیر می‌باشد:

$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2$$

$$\begin{cases} V_{GS} = V_{DS} = V_D - V_S = V_D = -2V \\ I_D = 10\,mA \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T) \Rightarrow 10\,mA = \frac{K}{2}(-2+1)^2 \Rightarrow K = 20\,\frac{mA}{V^2}$$

افت ولتاژ دیود:

$$V_{GS} = V_{DS}$$

$$I_D = 1mA$$

$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1 = \frac{20}{2}(V_{DS} - (-1))^2$$

$$\Rightarrow (V_{DS} + 1)^2 = 0/1 \Rightarrow V_{DS} + 1 = \pm 0/32$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS} = -1/32V \\ V_{DS} = -0/68V \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -1/32V \\ V_{GS} = -0/68V \end{cases}$$

به ازای $V_{GS} = -0/68V$ ، $V_{GS} < V_T$ می‌باشد که قابل قبول نمی‌باشد چون در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود. ولی مقدار $V_{GS} = -1/32V$ قابل قبول می‌شود. پس ولتاژ دو سر دیود $V_{GS} = 1/32V$ می‌باشد.

$$I_D = 0/1mA \Rightarrow 0/1 = \frac{20}{2}(V_{DS} + 1)^2 \Rightarrow (V_{DS} + 1)^2 = 0/01 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS} = -1/1V \\ V_{DS} = -0/9V \end{cases}$$

مانند دلایل حالت قبل $V_{DS} = -0/9V$ قابل قبول نمی‌باشد و $V_{DS} = -1/1V$ قابل قبول می‌باشد. پس ولتاژ دو سر دیود ۱/۱V می‌باشد.

۲۲ ـ دیود مسأله ۷ ـ ۲۱ به صورت سری با یک مقاومت ۵KΩ به یک منبع ولتاژ ۱۰V متصل شده است. ولتاژ دو سر دیود چند ولت است؟

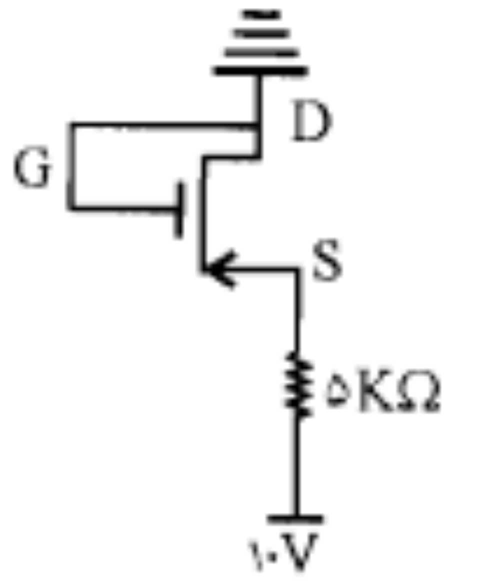
☑ **راه حل:**

در صورت مسأله ۲۱ داشتیم گیت و درین PMOS به هم وصل شده است و به ازای ولتاژ ۲ ولت دیود شدت جریان ۱۰ mA را از خود عبور می‌دهد و چون گیت و درین به هم متصل می‌باشند $V_{GS} = V_{DS}$ می‌شود پس؛

$$V_{GS} = V_{DS}$$

$$I_D = \frac{k}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 10\,mA = \frac{K}{2}(-2+1)^2 \Rightarrow K = 20\,\frac{mA}{V^2}$$

با توجه به صورت این مسأله شکل مدار به صورت زیر می‌باشد:



به دست آوردن ولتاژ دو سر دیود: $V_{DS} = ?$

$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = \frac{20}{2}(V_{GS} - V_T)^2 = 10(V_{DS} + 1)^2 \quad (I)$$

$$KVL: V_{DS} = -10 + 5I_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{DS} + 10}{5} \quad (II)$$

در رابطه (I) به جای I_D مقدار I_D به دست آمده از رابطه (II) را قرار می‌دهیم:

$$\frac{V_{DS} + 10}{5} = 10(V_{DS} + 1)^2 \Rightarrow V_{Ds} + 10 = 50(V_{DS} + 1)^2$$

$$\Rightarrow 50V_{DS}^2 + 99V_{DS} + 40 = 0 \Rightarrow$$

با حل این معادله مقادیر زیر برای V_{DS} به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} V_{DS} = -0/56 \\ V_{DS} = -1/41 \end{cases}$$

$V_{DS} = -0/56$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت $V_{GS} > V_T$ می‌شود در حالی‌که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ باشد. $V_{DS} = -1/41$ قابل قبول می‌باشد چون در این صورت $V_{GS} < V_T$ می‌باشد پس مقدر ولتاژ دو سر دیود برابر است با: $V_{DS} = 1/41V$

۲۳ ـ دیود طراحی شده در مسأله ۷ ـ ۲۱ قرار است به صورت یک تنظیم کننده ولتاژ موازی که توسط یک جریان ۱۰ mA تغذیه می‌شود به کار رود. ولتاژ خروجی تنظیم‌کننده چقدر است؟ مقاومت خروجی تنظیم‌کننده چقدر است در صورتی که یک جریان بار ۱ mA از تنظیم کننده کشیده شود (توسط یک R_L موازی) افت ولتاژ دو سر آن چقدر خواهد بود؟

www.PnuEB.com

☑ **راه حل:**

در مسأله ۲۱ به دست آوردیم:

$$V_{GS} = V_{DS} \quad , \quad I_D = \frac{k}{۲}(V_{GS} - V_T)^۲ = \frac{۲۰}{۲}(V_{DS} - V_T)^۲$$

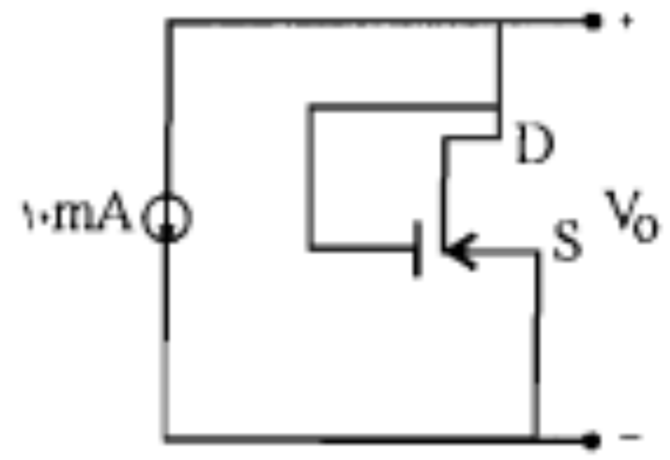
از طرفی $I_D = ۱۰(۱ - V_O)^۲ \Leftarrow V_{DS} = -V_D = -V_O \quad , \quad V_T = -۱$

$$I_D = ۱۰\,mA \Rightarrow I_D = ۱۰(۱ - V_O)^۲ \Rightarrow ۱۰ = ۱۰(۱ = V_O)^۲$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_O = ۰\,V \\ V_O = ۲\,V \end{cases}$$

$V_O = ۰\,V$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت:

$$V_O = -V_{DS} = -V_{GS} = ۰\,V > V_T$$



در حالی که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود.

ولی $V_O = ۲V$ قابل قبول می‌باشد چون:

$$V_O = -V_{DS} = -V_{GS} = +۲V \Rightarrow V_{GS} = -۲V < V_T$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی:

برای محاسبه مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ V در خروجی گذاشته و I آن محاسبه می‌شود:

$$I = ۱۰(۱ - V)^۲$$

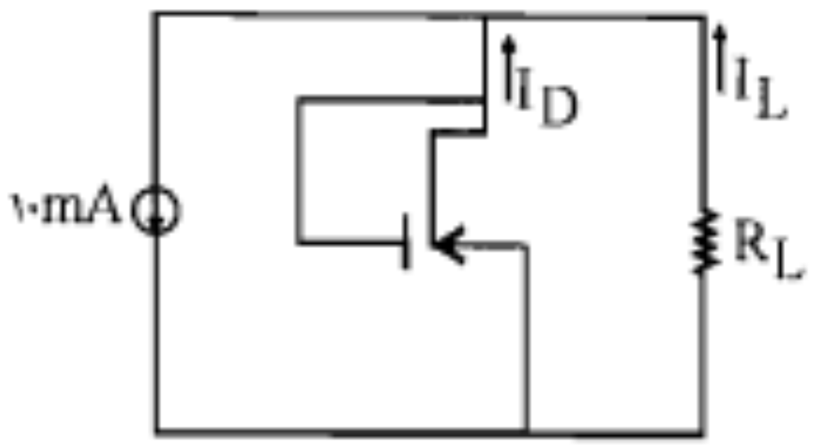
چون رابطه بین I و V خطی نمی‌باشد پس داریم:

$$R_O = \frac{dV}{dI}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{dV}{۱۰ \times ۲ \times (۱ - V) \times (-dV)} = \frac{۱}{-۲۰(۱ - V)}$$

(در حالت قبل به دست آمده) $V = ۲V \Rightarrow R_O = \frac{۱}{-۲۰(۱ - ۲)} = \frac{۱}{۲۰}\,K\Omega = ۵۰\,\Omega$

حال اگر یک جریان بار ۱ mA از تنظیم‌کننده توسط یک مقاومت R_L موازی کشیده شود:



$$I = I_D + I_L \Rightarrow ۱۰\,mA = I_D + ۱ \Rightarrow I_D = ۹\,mA$$

از طرفی $I_D = ۱۰(۱ - V_O)^۲ \Rightarrow ۹ = ۱۰(۱ - V_O)^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_O = ۰/۰۵\,V \\ V_O = ۱/۹۵\,V \end{cases}$

$V_O = ۰/۰۵\,V$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت:

$$V_{GS} = -V_O = -۰/۰۵ \Rightarrow V_{GS} > V_T$$

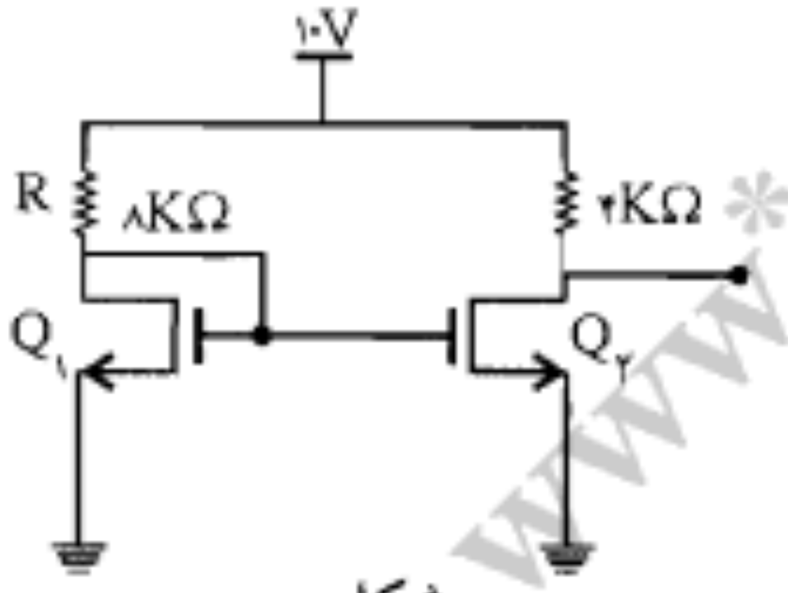
در حالی که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود $V_O = ۱/۹۵\,V$ قابل قبول می‌باشد چون:

$$V_{GS} = -V_O = -۱/۹۵\,V < V_T = -۱V$$

پس $V_O = ۱/۹۵^V$

(افت ولتاژ دو سر دیود) $\Delta V_O = ۲ - ۱/۹۵ = ۰/۰۵\,V \Rightarrow \Delta V_O = ۵۰\,mV$

۲۴ـ دو NMOS مشابه، با $V_T = ۱\,V$ و $K = ۱\frac{mA}{V^۲}$ به صورت شکل م ـ ۲۴ به هم وصل شده‌اند. ولتاژ خروجی V_O چند ولت است؟ اگر مقاومت R به ۴ KΩ کاهش یابد ولتاژ V_O چقدر خواهد شد؟



شکل م-۲۴

☑ **راه حل:**

$$V_O = ۱۰ - ۴I_{D_۲} \qquad (I)$$

$$Q_۱: V_{GS_۱} = V_{G_۱} - V_{S_۱} = ۱۰ - ۸I_{D_۱} - ۰ = ۱۰ - ۸I_{D_۱}$$

$$I_{D_۱} = \frac{K}{۲}(V_{GS_۱} - V_T)^۲ = \frac{۱}{۲}(۱۰ - ۸I_{D_۱} - ۱)^۲ \Rightarrow$$

$$۲I_{D_۱} = (۹ - ۸I_{D_۱})^۲ \Rightarrow I_{D_۱} = \begin{cases} ۱/۳۳\,mA \\ ۰/۹۵\,mA \end{cases}$$

$I_{D_۱} = ۰/۹۵\,mA$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این حالت $V_{GS_۱} = ۱۰ - ۸I_{D_۱} = -۰/۶۴\,V$ می‌شود که از V_T کوچکتر می‌باشد در حالی که در NMOS باید $V_{GS} > V_T$ باشد پس $I_{D_۱} = ۱/۳۳$ قابل قبول

www.PnuEB.com

نمی‌باشد ولی با $I_D = ۰/۹۵ mA$ ، $V_{GS_1} > V_T$ می‌باشد پس $I_D = ۰/۹۵ mA$ قابل قبول می‌باشد.

از طرفی: $I_{D_1} = I_{D_2} = ۰/۹۵ \overset{(1)}{\Rightarrow} V_O = ۱۰ - ۴ \times ۰/۹۵ = ۶/۲V$

حال اگر $R = ۴K\Omega$ باشد:

$$V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1} = ۱۰ - ۴I_{D_1}$$

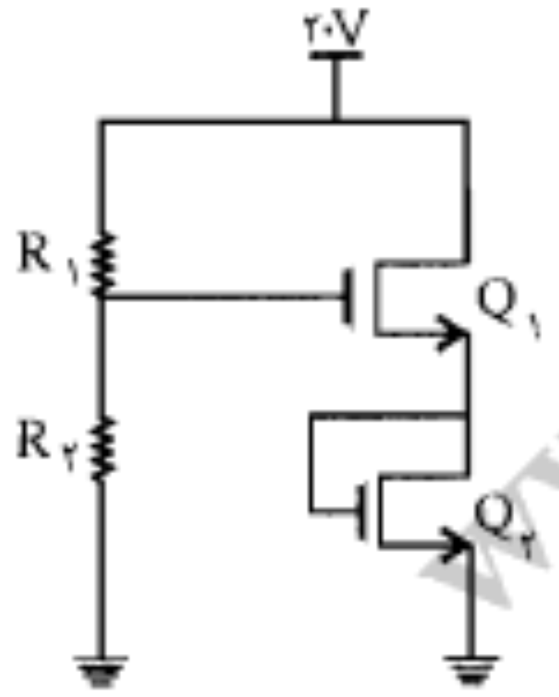
$$I_{D_1} = \frac{K}{۲}(V_{GS_1} - V_T)^۲ = \frac{۱}{۲}(۱۰ - ۴I_{D_1} - ۱)^۲ \Rightarrow$$

$$۲I_{D_1} = (۹ - ۴I_{D_1})^۲ \Rightarrow I_{D_1} = \begin{cases} ۲/۸۵ \ mA \\ ۱/۷۸ \ mA \end{cases}$$

با $I_{D_1} = ۲/۸۵$ داریم: $V_{GS_1} = ۱۰ - ۴I_{D_1} = -۱/۴V$ می‌بینیم که $V_{GS_1} < V_T$ می‌باشد که از V_T کوچکتر است پس $I_{D_1} = ۲/۸۵$ قابل قبول نمی‌باشد ولی با $I_D = ۱/۷۸$ داریم $V_{GS_1} = ۲/۸۸$ که از V_T بزرگتر است پس قابل قبول می‌باشد.

$$I_{D_1} = I_{D_2} = ۱/۷۸mA$$

$$\Rightarrow V_O = ۱۰ - ۴I_{D_2} = ۱۰ - ۴ \times ۱/۸۷ = ۲/۸۸V$$



شکل م_۲۵

۲۵ـ دو MOS مشابه به صورت شکل م ـ ۲۵ به هم متصل شده‌اند. در صورتی که $V_T = ۲V$ و $K = ۰/۵\frac{mA}{V^۲}$ باشد مقاومت‌های R_1 و R_2 را طوری به دست آورید که جریان ۱ mA از ترانزیستورها عبور کرده و در گیت Q_1 حداکثر مقاومت ممکن را داشته باشیم. بزرگترین مقاومت در دسترس ۱۰ MΩ است. در صورتی که در اثر تغییر فرآیند ساخت مقدار V_T به ۱/۵V کاهش یابد، جریان I_D چه مقدار خواهد شد؟ (در صورتی که به جای Q_2 از یک مقاومت $(R_S = ۱K\Omega)$ استفاده می‌کردیم جریان I_D هنگامی که V_T ترانزیستور Q از ۲ به ۱/۵ ولت تغییر می‌کرد چه مقدار می‌باشد؟

☑ **راه حل:**

در MOS (Q_2) چون گیت و درین به هم متصل می‌باشند $V_{GD} = ۰V$ می‌باشد پس $V_{GS} = V_{DS}$ می‌شود و چون $V_{GD} = ۰V < V_T = ۲V$ می‌باشد پس ترانزیستور در ناحیه اشباع می‌باشد پس داریم:

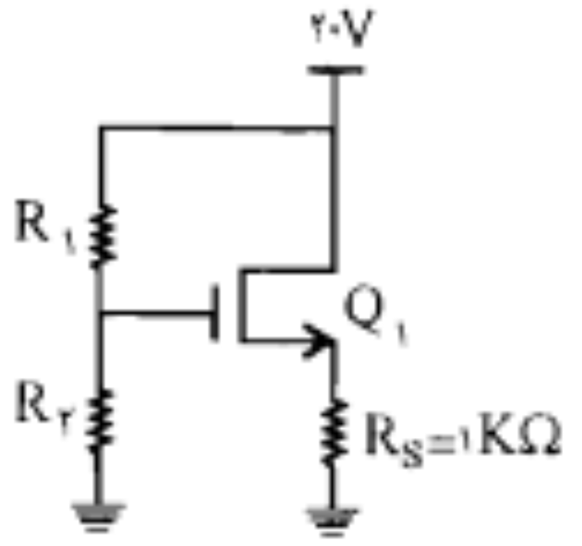
$$I_{D_2} = \frac{K_2}{۲}(V_{GS_2} - V_{T_2})^۲ \Rightarrow ۱ = \frac{۰/۵}{۲}(V_{GS_2} - ۲)^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_2} = ۴V \\ V_{GS_2} = ۰V \quad \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{G_2} = V_{S_1} = ۴V \Rightarrow V_{GS_2} = ۴ - ۰ = ۴V$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{۰/۵}{۲}(۴ - ۱/۵)^۲ = ۱/۵۶ \ mA$$

$$\Delta I_D = ۱/۵۶ - ۱mA = ۰/۵۶ \ mA$$

حال اگر به جای Q_2 MOS مقاومت ۱KΩ قرار دهیم طبق شکل مقابل داریم:



$$I_D = \frac{K}{۲}(V_{GS_1} - V_T)^۲ = \frac{۰/۵}{۲}(V_{GS_1} - ۱/۵)^۲$$

$$= \frac{۱}{۴}(V_{G_1} - V_{S_1} - ۱/۵)^۲$$

از طرفی: $\begin{cases} V_{S_1} = R_S \times I_D \\ V_{G_1} = V_{th} = ۸V \end{cases}$

$$\Rightarrow I_D = \frac{۱}{۴}(۸ - ۱ \times I_D - ۱/۵)^۲ \Rightarrow$$

با حل این معادله مقادیر زیر برای I_D به دست می‌آید:

$$I_D = \begin{cases} ۳/۰۲ \ mA \\ ۱۳/۹۷ \ mA \end{cases}$$

$$I_D = ۱۳/۹۷ \Rightarrow V_{GS} = ۸ - ۱ \times ۱۳/۹۷ < ۰$$

$I_D = ۱۳/۹۷$ قابل قبول نمی‌باشد.

چون در این حالت V_{GS} یک عدد منفی به دست می‌آید که از V_T کوچکتر می‌باشد پس این مقدار I_D قابل قبول نمی‌باشد.

$$I_D = ۳/۰۲ \Rightarrow V_{GS} = ۸ - ۱ \times ۳/۰۲$$

با $I_D = ۳/۰۲$ مقداری که برای V_{GS} به‌دست می‌آید عددی است که از V_T بزرگتر است پس این مقدار I_D قابل قبول می‌باشد.

حال اگر $V_T = ۲V$ شود داریم:

$$I_D = \frac{۱}{۴}(۸ - I_D - ۲) \Rightarrow I_D = \begin{cases} ۲/۷۱ \\ ۱۳/۲۹ \end{cases}$$

مانند دلایل حالت قبل $I_D = ۱۳/۲۹$ قابل قبول نمی‌باشد و $I_D = ۲/۷۱$ قابل قبول است پس

$$I_D = ۲/۷۱ \Rightarrow \Delta I_D = ۳/۰۲ - ۲/۷۱ = ۰/۳۱ mA$$

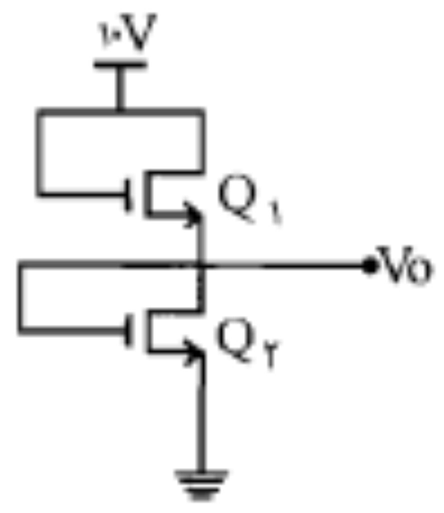
www.PnuEB.com

۲۶ ـ در مدار شکل م ـ ۲۶، در حالت‌های زیر V_O را محاسبه نمایید.

الف) $K_1 = K_2$ و $V_{T_1} = V_{T_2}$

ب) $K_1 = \frac{K_2}{4}$ و $V_{T_1} = V_{T_2}$

ج) $K_1 = K_2$ و $V_{T_1} = 4V_{T_2}$



شکل م ـ ۲۶

راه حل:

الف)

$$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{2}(V_{GS_2} - V_{T_2})^2$$

از طرفی: $\begin{cases} K_1 = K_2 \\ V_{T_1} = V_{T_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_1}{2}(V_{GS_2} - V_{T_1})^2$

$$\Rightarrow (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = (V_{GS_2} - V_{T_1})^2 \Rightarrow V_{GS_1} = V_{GS_2}$$

$$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{2}(V_{GS_2} - V_{T_2})^2$$

از طرفی: $\begin{cases} V_{G_1} = 10^V \\ V_{S_1} = V_O \end{cases} , \begin{cases} V_{G_2} = V_O \\ V_{S_2} = 0^V \end{cases} \Rightarrow (10 - V_O) = (V_O - 0) \Rightarrow V_O = 5^V$

ب)

$$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{k_1}{2}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{k_2}{2}(V_{GS_2} - V_{T_2})^2$$

از طرفی: $\begin{cases} K_1 = \frac{K_2}{4} \\ V_{T_1} = V_{T_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{K_2}{2 \times 4}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{2}(V_{GS_2} - V_{T_1})^2$

$$\Rightarrow V_{GS_1} - V_{T_1} = 2(V_{GS_2} - V_{T_1}) \quad , \quad \begin{cases} V_{G_1} = 10 \\ V_{S_1} = V_O \end{cases} , \begin{cases} V_{G_2} = V_O \\ V_{S_2} = 0V \end{cases}$$

$$\Rightarrow (10 - V_O - V_{T_1}) = 2(V_O - 0 - V_{T_1}) \Rightarrow 3V_O = 10 + V_{T_1} \Rightarrow V_O = \frac{10 + V_{T_1}}{3}$$

ج)

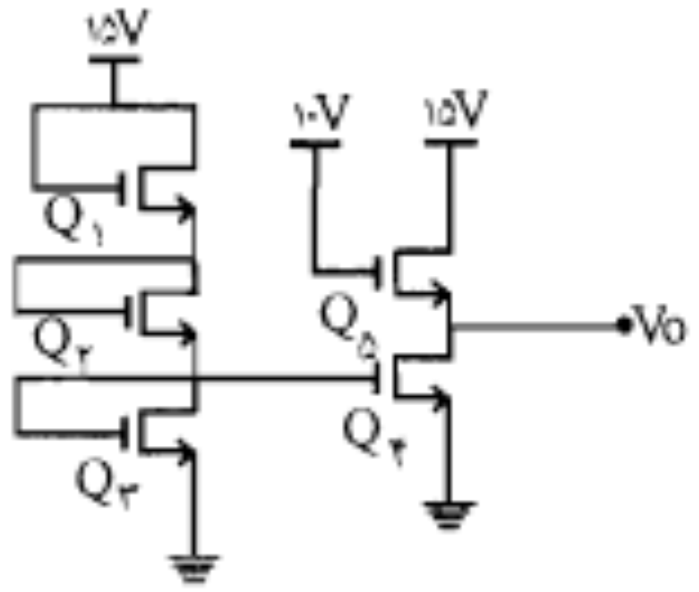
$$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{2}(V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \quad , \quad \begin{cases} K_1 = K_2 \\ V_{T_1} = 4V_{T_2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow (V_{GS_1} - 4V_{T_2})^2 = (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \Rightarrow V_{GS_1} - 4V_{T_2} = V_{GS_2} - V_{T_2}$$

$$\begin{cases} V_{G_1} = 10 \\ V_{S_1} = V_O \end{cases} , \begin{cases} V_{G_2} = V_O \\ V_{S_2} = 0 \end{cases} \Rightarrow (10 - V_O - 4V_{T_2}) = (V_O - 0 - V_{T_2}) \Rightarrow 2V_O = 10 - 3V_{T_2}$$

$$\Rightarrow V_O = \frac{10 - 3V_{T_2}}{2}$$

۲۷ ـ در مدار شکل م ـ ۲۷ همه MOS ها مشابه‌اند. ولتاژ V_O چقدر است؟



شکل م ـ ۲۷

راه حل:

سه ترانزیستور Q_1 و Q_2 و Q_3 مشابه هستند پس داریم:

$$V_{DS} = \frac{15}{3} = 5V$$

$$V_{DS_3} = V_{D_3} - V_{S_3} = V_{G_3} - 0 = V_{G_3} = 5V$$

$$Q_4 : I_{D_4} = \frac{K}{2}(V_{GS_4} - V_{T_4})^2 \Rightarrow I_{D_4} = \frac{K}{2}(V_{G_4} - V_{S_4} - V_T)^2$$

$\Rightarrow \begin{cases} V_{G_4} = V_{G_3} = 5v \\ V_{S_4} = 0V \end{cases}$ گیت Q_3 و Q_4 به هم متصل می‌باشد سورس Q_4 زمین شده است.

$$\Rightarrow I_{D_4} = \frac{K}{2}(5 - V_T)^2$$

$Q_5 : V_{GD_5} = -5V < V_T \Rightarrow$ Q_5 در اشباع است.

$$I_{D_5} = \frac{k}{2}(V_{GS_5} - V_{T_5})^2 = \frac{K}{2}(V_{G_5} - V_{S_5} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{G_5} = 10V \\ V_{S_5} = V_O \end{cases} \Rightarrow I_{D_5} = \frac{K}{2}(10 - V_O - V_T)^2$$

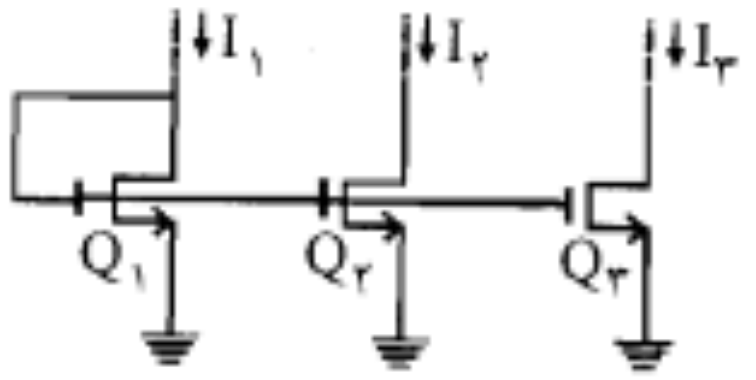
www.PnuEB.*.com

از طرفی: $I_{D_۴} = I_{D_۵} \Rightarrow \frac{K}{۲}(۵ - V_T)^۲ = \frac{K}{۲}(۱۰ - V_O - V_T)^۲ \Rightarrow$

$(۵ - V_T)^۲ = (۱۰ - V_O - V_T)^۲ \Rightarrow ۵ - V_T = ۱۰ - V_O - V_T \Rightarrow$

$V_O = ۵V$

۲۸ـ در مدار شکل م ـ ۲۸، با فرض $V_{T_۱} = V_{T_۲} = V_{T_۳}$ و $K_۱ = K_۲ = \frac{K_۳}{۲}$ و $I_۱ = ۱mA$ مقادیر $I_۲$ و $I_۳$ را محاسبه نمایید.



شکل م ـ ۲۸

$V_{GD_۱} = ۰$ بوده و چون $V_{GD_۱} < V_{T_۱}$ می‌باشد پس $Q_۱$ در حالت اشباع است:

$Q_۱: I_۱ = I_{D_۱} = \frac{K_۱}{۲}(V_{GS_۱} - V_{T_۱})^۲ \Rightarrow ۱mA = \frac{K_۱}{۲}(V_{GS_۱} - V_{T_۱})^۲$

$\Rightarrow K_۱(V_{GS_۱} - V_{T_۱})^۲ = ۲ \quad (I)$

$Q_۲: I_{D_۲} = I_۲ = \frac{K_۲}{۲}(V_{GS_۲} - V_{T_۲})^۲$

گیت دو ترانزیستور $Q_۱$ و $Q_۲$ به هم وصل و سورس هر دوی آنها زمین می‌باشد پس $V_{GS_۱} = V_{GS_۲}$

از طرفی: $K_۱ = K_۲ \quad , \quad V_{T_۱} = V_{T_۲} \Rightarrow$

$\Rightarrow I_۲ = \frac{K_۱}{۲}(V_{GS_۱} - V_{T_۱}) \quad (II)$

رابطه (I) را در رابطه (II) قرار می‌دهیم:

$\Rightarrow I_۲ = \frac{۲}{۲} = ۱mA$

$Q_۳: I_۳ = I_{D_۳} = \frac{K_۳}{۲}(V_{G_۳} - V_{T_۳})^۲$

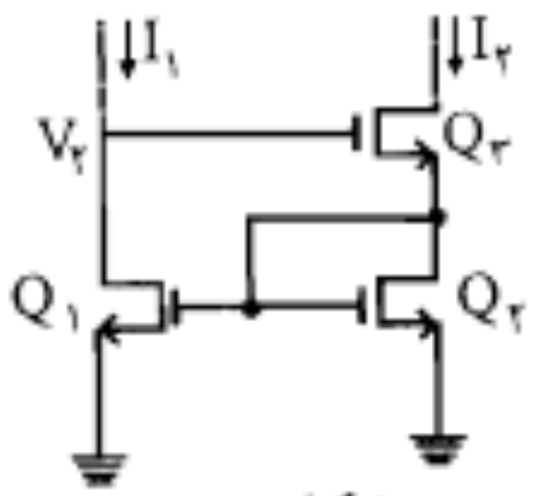
$K_۱ = K_۲ = \frac{K_۳}{۲} \quad , \quad V_{T_۱} = V_{T_۲} = V_{T_۳}$

چون گیت سه ترانزیستور به هم متصل می‌باشد و سورس هر سه آنها زمین شده است پس داریم:

$V_{GS_۱} = V_{GS_۲} = V_{GS_۳}$

$\Rightarrow I_۳ = \frac{۲K_۱}{۲}(V_{GS_۱} - V_{T_۱})^۲ = \frac{۲ \times ۲}{۲} = ۲mA$

۲ـ مدار شکل م ـ ۲۹ را در نظر بگیرید. با فرض $V_{T_۱} = V_{T_۲} = V_{T_۳}$ و $I_۱ = ۱mA$ و $K_۱ = K_۲ = K_۳ = ۲\frac{mA}{V}$، مقادیر $I_۲$ و $V_۱$ و $V_۲$ را به دست آورید.



شکل م ـ ۲۹

راه حل:

$I_۱ = \frac{K_۱}{۲}(V_{GS_۱} - V_{T_۱})^۲ \Rightarrow ۱mA = \frac{۲}{۲}(V_{GS_۱} - ۲)^۲ \Rightarrow ۱ = (V_{G_۱} - V_{S_۱} - ۲)^۲$

$V_{S_۱} = ۰V \Rightarrow ۱ = (V_{G_۱} - ۲)^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{G_۱} - ۲ = ۱ \Rightarrow V_{G_۱} = ۳V \\ V_{G_۱} - ۲ = -۱ \Rightarrow V_{G_۱} = ۱V \end{cases}$

$V_{G_۱} = ۱$ قابل قبول نمی‌باشد چون $V_{GS} = ۱V < V_T$ نمی‌باشد.

$V_{G_۱} = ۳V$ قابل قبول $\Rightarrow V_۱ = V_{G_۱} = ۳V$

$I_۲ = I_{D_۲} = I_{D_۲} = \frac{K_۲}{۲}(V_{GS_۲} - V_{T_۲})^۲ \Rightarrow \begin{cases} V_{S_۲} = ۰ \\ V_{G_۱} = V_{G_۲} = ۳V \end{cases}$

$\Rightarrow I_۲ = \frac{۲}{۲}(۳ - ۲)^۲ = ۱mA$

$I_{D_۳} = I_{D_۲} = ۱mA \Rightarrow ۱mA = \frac{K_۳}{۲}(V_{GS_۳} - V_{T_۳})^۲ \Rightarrow$

$۱mA = \frac{۲}{۲}(V_{G_۳} - V_{S_۳} - ۲)^۲$

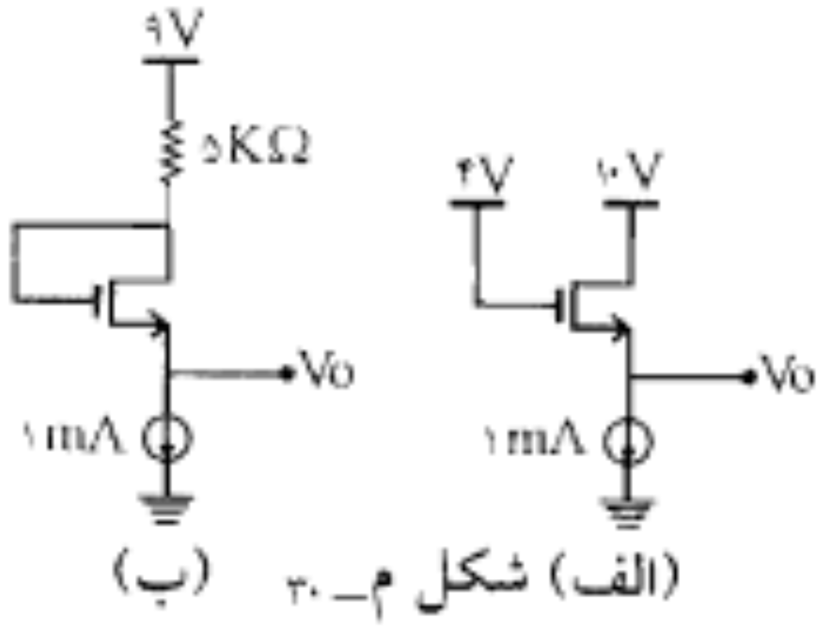
از طرفی: $V_{S_۳} = V_۱ = ۳V \Rightarrow ۱ = (V_{G_۳} - ۳ - ۲)^۲ \Rightarrow$

$$V_{G_2} - 5 = \pm 1 \Rightarrow \begin{cases} V_{G_2} = 6\,V \\ V_{G_2} = 4\,V \Rightarrow \quad \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases}$$

$V_{G_2} = 4\,V$ باشد در این صورت $V_{GS_2} = 4 - 3 = 1V$ می‌شود که از V_T کمتر می‌باشد پس $V_{G_2} = 4\,V$ قابل قبول نمی‌باشد پس داریم:

$$V_{G_2} = 6\,V \Rightarrow V_2 = V_{G_2} = 6\,V$$

۳۰ـ در مدارهای شکل م ـ ۳۰، $V_T = 2V$ و $K = 0/5\frac{mA}{V^2}$ است. مقادیر V_O و مقاومت دیده شده از سر سورس را به دست آورید.



(ب) (الف) شکل م ـ ۳۰

☑ راه حل:

شکل (الف)

$$V_{GD} = -10 + 4 = -6\,V < V_T$$

پس در ناحیه اشباع می‌باشد.

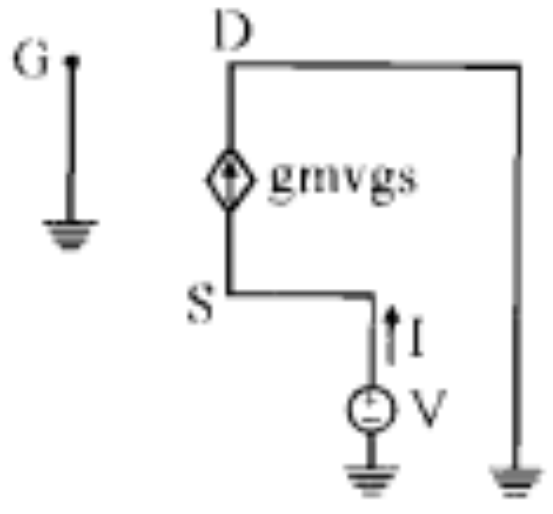
$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1mA = \frac{0/5}{2}(V_{GS} - 2)^2 \Rightarrow$$

$$(V_{GS} - 2)^2 = 4 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} - 2 = 2 \Rightarrow V_{GS} = 4\,V \\ V_{GS} - 2 = -2 \Rightarrow V_{GS} = 0\,V \end{cases}$$

از طرفی برای اینکه ترانزیستور در اشباع باشد باید $V_{GS} > V_T$ باشد پس $V_{GS} = 0\,V$ قابل قبول نمی‌باشد.

$$V_{GS} = 4\,V \Rightarrow V_G - V_S = 4V \Rightarrow 4 - V_O = 4 \Rightarrow V_O = 0\,V$$

به دست آوردن مقاومت دیده شده از سر سورس:



$$g_m = K(V_{GS} - V_T) = 0/5(4 - 2) = 1\frac{mA}{V}$$

$$I = -g_m V_{gs} = -1 \times V_{gs} = -V_{gs} = -(0 - V) = V$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{V} = 1\,K\Omega$$

شکل (ب)

$$I_D = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1 = \frac{0/5}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow$$

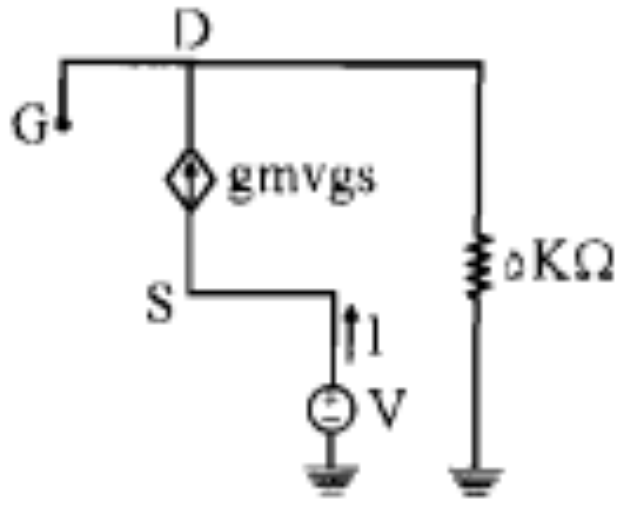
$$\begin{cases} V_{GS} = 4\,V \\ V_{GS} = 0\,V \Rightarrow \quad \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases} \quad \Rightarrow V_{GS} = 4\,V$$

$$V_s = V_O \quad , \quad I_D = I_S$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 4\,V \Rightarrow V_G = 9 - 5I_D$$

$$\Rightarrow 9 - 5I_D - V_O = 4 \Rightarrow 9 - 5 \times 1 - V_O = 4 \Rightarrow V_O = 0$$

مقاومت دیده شده از سر سورس

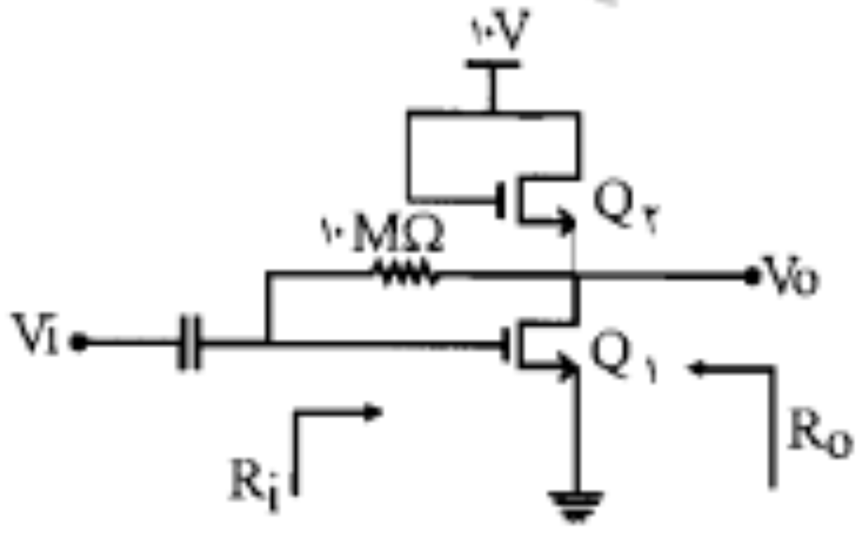


$$g_m = K(V_{GS} - V_T) = 0/5(4 - 2) = 1\frac{mA}{V}$$

$$I = -g_m V_{gs} = -1 \times V_{gs} = -V_{gs} \qquad \begin{cases} V_g = V_d = 5I_d = 5I \\ V_S = V \end{cases}$$

$$\Rightarrow I = -(5I - V) \Rightarrow 6I = V \rightarrow R = \frac{V}{I} = 6\,K\Omega$$

۳۱ـ در مدار شکل م ـ ۳۱، $V_{T_1} = V_{T_2} = 2V$ و $K_1 = 36\frac{mA}{V^2}$ و $K_2 = 0/5\frac{mA}{V^2}$ است. مقدار ولتاژ خروجی (V_O) را به دست آورید. A_V و R_i و R_O را محاسبه نمایید.



شکل م ـ ۳۱

☑ راه حل:

در دو MOSFET (Q_1, Q_2)، $V_{GD} = 0$ می‌باشد پس $V_{GD} < V_T$ است پس دو MOSFET در ناحیه اشباع می‌باشد چون شرط اینکه NMOS در ناحیه اشباع باشد $V_{GD} < V_T$ و $V_{GS} > V_T$ می‌باشد. و چون جریان مقاومت ۱۰ MΩ بسیار کم می‌باشد پس داریم:

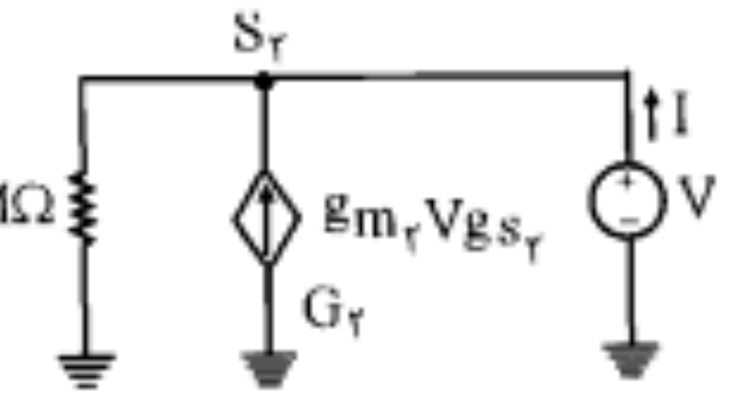
www.PnuEB.com

$$\frac{V_O - V_i}{۱۰^۴} = (۲/۷ \times (-V_O) - ۲۲/۶۸ \times V_i) \Rightarrow (V_O - V_i) = ۱۰^۴(-۲/۷ V_O - ۲۲/۶۸ V_i)$$

$$(۲۷۰۰۱)\, V_O = -۲۲۶۷۹۹\, V_i \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -۸/۳۹$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\frac{V_i - V_O}{۱۰\, M\Omega}} = \frac{۱۰\, V_i}{V_i - V_O} = \frac{۱۰}{۱ - A_V} = \frac{۱۰}{۱ + ۸/۳۹} = ۱/۰۶\ M\Omega$$

محاسبه R_O: برای محاسبه R_O در خروجی منبع V می‌گذاریم و منبع ورودی را صفر قرار می‌دهیم.



$$V_{gs_1} = V_i = ۰$$

با توجه به مدار مقابل داریم:

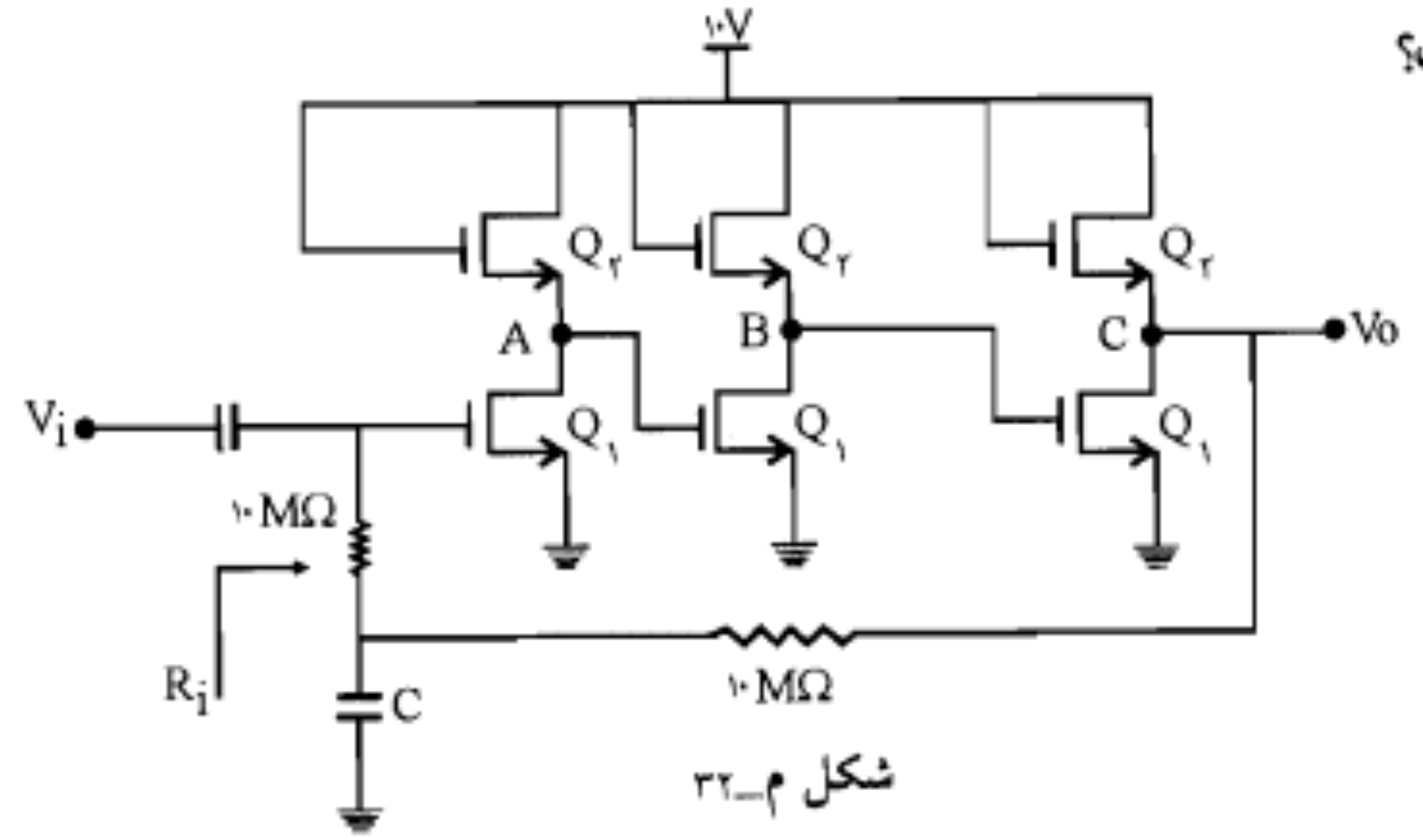
$$V_{gs_۲} = -V$$

$$I = -g_{m_۲} V_{gs_۲} + \frac{V}{۱۰۰۰۰} \Rightarrow I = -g_{m_۲}(-V) + \frac{V}{۱۰۰۰۰}$$

از $\frac{۱}{۱۰۰۰۰}$ در مقابل ۲/۷ ($g_{m_۲}$) صرفنظر می‌کنیم پس داریم:

$$I \simeq ۲/۷V \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{۱}{۲/۷ K\Omega}$$

۳۲ـ در مدار شکل م ـ ۳۲، با فرض $V_{T_1} = V_{T_۲} = ۲V$ و $K_1 = ۴\frac{mA}{V^۲}$ و $K_۲ = ۰/۵\frac{mA}{V^۲}$ و بزرگ بودن خازن‌ها، ولتاژ DC خروجی و A_V و R_i را محاسبه نمایید. برای $C = ۰$ مقاومت ورودی مدار چقدر است؟



شکل م_۳۲

$$I_{D_1} = I_{D_۲}$$

$$\Rightarrow \frac{K_1}{۲}(V_{GS_1} - V_{T_1})^۲ = \frac{K_۲}{۲}(V_{GS_۲} - V_{T_۲})^۲ \Rightarrow \frac{۳۶}{۲}(V_{GS_1} - V_{T_1})^۲ = \frac{۰/۵}{۲}(V_{GS_۲} - V_{T_۲})^۲$$

$$\Rightarrow ۷۲(V_{GS_1} - V_{T_1})^۲ = (V_{GS_۲} - V_{T_۲})^۲ \Rightarrow \pm ۶\sqrt{۲}(V_{GS_1} - V_{T_1}) = (V_{GS_۲} - V_{T_۲})\ \text{(A)}$$

چون $G_۲$ مستقیماً به $D_۲$ متصل شده است: ⇐ از طرفی:

$$\begin{cases} KVL: V_{DS_1} + V_{DS_۲} = ۱۰\,V \\ V_{GS_۲} = V_{DS_۲}\ \text{(II)} \\ V_{GS_1} \simeq V_{DS_1}\ \text{(III)} \end{cases}$$

$$\text{(II)},\text{(III)} \Rightarrow \text{(I)}: V_{GS_1} + V_{GS_۲} = ۱۰ \Rightarrow V_{GS_۲} = ۱۰ - V_{GS_1}\ \text{(B)}$$

رابطه (B) را در رابطه (A) قرار می‌دهیم:

$$V_{T_1} = V_{T_۲} = ۲V$$

$$\pm ۶\sqrt{۲}(V_{GS_1} - ۲) = (۱۰ - V_{GS_1} - ۲) = ۸ - V_{GS_1}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (۶\sqrt{۲} + ۱)V_{GS_1} = ۸ + ۱۲\sqrt{۲} \Rightarrow V_{GS_1} = ۲/۶۳V \\ (+۶\sqrt{۲} - ۱)V_{GS_1} = ۱۲\sqrt{۲} - ۸ \Rightarrow V_{GS_1} = ۱/۲V \Rightarrow V_{GS_1} < V_{T_1} \end{cases}$$

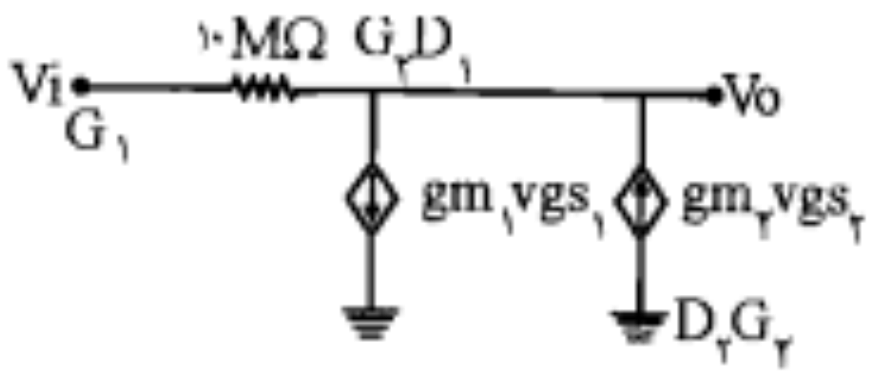
قابل قبول نمی‌باشد

پس $V_{GS_1} = ۲/۶۳V$ قابل قبول می‌باشد: $V_{GS_۲} = ۱۰ - V_{GS_1} = ۱۰ - ۲/۶۳ = ۷/۳۷V$

$$V_O = V_{DS_1} \simeq V_{GS_1} = ۲/۶۳\ V$$

$$\begin{cases} g_{m_1} = ۲ \times \frac{K_1}{۲}(V_{GS_1} - V_{T_1}) = ۳۶(۲/۶۳ - ۲) = ۲۲/۶۸\frac{mA}{V} \\ g_{m_۲} = ۲ \times \frac{۰/۵}{۲}(۷/۳۷ - ۲) = ۲/۷\frac{mA}{V} \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد



$$\begin{cases} V_{gs_1} = V_i \\ V_{gs_۲} = -V_O \end{cases}$$

$$\frac{V_O - V_i}{۱۰ \times ۱۰^۳} = g_{m_۲} V_{gs_۲} - g_{m_1} V_{gs_1}$$

www.*PnuEB*.com

☑ راه حل:

ابتدا و MOSFET (Q_1 و Q_2) سمت چپ را در نظر می‌گیریم. داریم:

$$\begin{cases} I_{D_2}=I_{D_1} \\ I_D=\frac{K}{2}(V_{GS}-V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1}-V_{T_1})^2=\frac{K_2}{2}(V_{GS_2}-V_{T_1})^2 \end{cases} \qquad (I)$$

(I_{D_1} و I_{D_2} جریان دو MOSFET سمت چپ می‌باشد.)

$$\begin{cases} V_{G_1}=V_O \\ V_{S_1}=0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1}=V_O \ (II) \quad , \quad \begin{cases} V_{G_2}=10\,V \\ V_{S_2}=V_A \end{cases} \rightarrow V_{GS_2}=10-V_A \ (III)$$

روابط (II) و (III) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$\frac{4}{2}(V_O-2)^2=\frac{0.5}{2}(10-V_A-2)^2 \Rightarrow 2(V_O-2)^2=0.25(8-V_A)^2$$

$$\Rightarrow 8(V_O-2)^2=(8-V_A)^2 \qquad (x)$$

حال دو MOSFET ستون وسط را در نظر می‌گیریم. در این دو MOSFET هم داریم:

$$\begin{cases} I_{D_2}=I_{D_1} \\ I_D=\frac{K}{2}(V_{GS}-V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1}-V_{T_1})^2=\frac{K_2}{2}(V_{GS_2}-V_{T_2})^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{G_1}=V_A \\ V_{S_1}=0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1}=V_A \quad , \quad \begin{cases} V_{G_2}=10\,V \\ V_{S_2}=V_B \end{cases} \rightarrow V_{GS_2}=10-V_B$$

با جایگذاری داریم: $\frac{4}{2}(V_A-2)^2=\frac{0.5}{2}(10-V_B-2)^2 \Rightarrow$

$$8(V_A-2)^2=(8-V_B)^2 \quad (y)$$

حال دو MOFSET سمت راست را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} I_{D_1}=I_{D_2} \\ I_D=\frac{K}{2}(V_{GS}-V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{2}(V_{GS_1}-V_{T_1})^2=\frac{K_2}{2}(V_{GS_2}-V_{T_2})^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{G_1}=V_B \\ V_{S_1}=0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1}=V_B \quad , \quad \begin{cases} V_{G_2}=10\,V \\ V_{S_2}=V_C=V_O \end{cases} \rightarrow V_{GS_2}=10-V_C$$

با جایگذاری داریم: $\frac{4}{2}(V_B-2)^2=\frac{0.5}{2}(10-V_O-2)^2 \Rightarrow$

$$8(V_B-2)^2=(8-V_O)^2 \quad (z)$$

$$(x),(y),(z) \Rightarrow \begin{cases} 8(V_O-2)^2=(8-V_A)^2 \\ 8(V_A-2)^2=(8-V_B)^2 \\ 8(V_B-2)^2=(8-V_O)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\sqrt{2}(V_O-2)=(8-V_A) & (A) \\ 2\sqrt{2}(V_A-2)=(8-V_B) & (B) \\ 2\sqrt{2}(V_B-2)=(8-V_O) & (C) \end{cases}$$

$$\begin{matrix}(B)\\(C)\end{matrix} \begin{cases} 2\sqrt{2}(V_A-2)=(8-V_B) \\ 2\sqrt{2}(V_B-2)=(8-V_O) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\sqrt{2}V_A-4\sqrt{2}-8+V_B=0 \\ 2\sqrt{2}V_B-4\sqrt{2}-8+V_O=0 \end{cases}$$

در این دو رابطه V_B را حذف می‌کنیم:

$$\begin{cases} -8V_A+16+16+16\sqrt{2}-2\sqrt{2}V_B=0 \\ 2\sqrt{2}V_B-4\sqrt{2}-8+V_O=0 \end{cases} \underset{\oplus}{\Rightarrow} -8V_A+8+12\sqrt{2}+V_O=0 \quad (D)$$

$$\begin{matrix}(D)\\(A)\end{matrix} \begin{cases} -8V_A+8+12\sqrt{2}+V_O=0 \\ 2\sqrt{2}V_O-4\sqrt{2}-8+V_A=0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -8V_A+8+12\sqrt{2}+V_O=0 \\ 16\sqrt{2}V_O-32\sqrt{2}-64+8V_A=0 \end{cases}$$

با جمع این دو رابطه داریم $(1+16\sqrt{2})V_O-20\sqrt{2}-56=0 \Rightarrow V_O=3.6\,V$

$(A);\ V_A=3.6\,V$

$(B):\ 2\sqrt{2}(3.6-2)=(8-V_B) \Rightarrow V_B=3.6\,V$

با اعداد به دست آمده مشخص می‌شود که Q_1 و Q_2 ها در حالت اشباع قرار دارند و در همه آنها V_{GS} از V_T بزرگتر می‌باشد.

www.PnuEB.com

در دو MOSFET سمت چپ:

$$\begin{cases} g_{m_۱} = ۲\times\frac{K_۱}{۲}(V_{GS_۱}-V_{T_۱}) \Rightarrow g_{m_۱} = ۴(V_O-۲) = ۴(۳/۶-۲) = ۶/۴\frac{mA}{V} \\ g_{m_۲} = ۲\times\frac{۰/۵}{۲}(۱۰-V_A-۲) = ۰/۵(۸-۳/۶) = ۲/۲\frac{mA}{V} \end{cases}$$

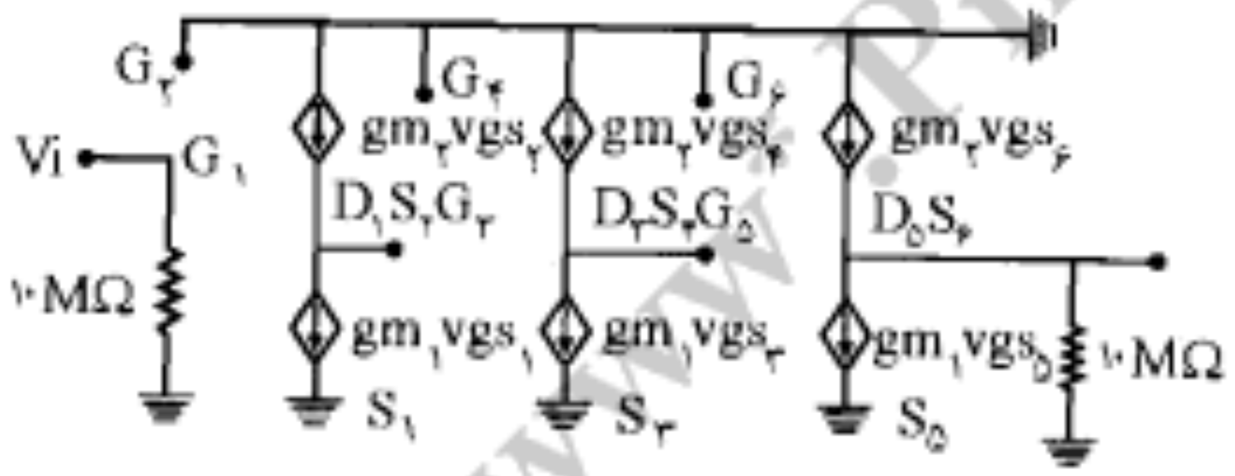
در دو MOSFET ستون وسط:

$$\begin{cases} g_{m_۱} = ۴(V_A-۲) = ۴(۳/۶-۲) = ۶/۴\frac{mA}{V} \\ g_{m_۲} = ۰/۵(۱۰-V_B-۲) = ۰/۵(۸-۳/۶) = ۲/۲\frac{mA}{V} \end{cases}$$

در دو MOSFET سمت راست:

$$\begin{cases} g_{m_۱} = ۴(V_B-۲) = ۴(۳/۶-۲) = ۶/۴\frac{mA}{V} \\ g_{m_۲} = ۰/۵(۱۰-V_C-۲) = ۰/۵(۸-۳/۶) = ۲/۲\frac{mA}{V} \end{cases}$$

مدار معادل:



در این مدار داریم:

$$V_O = (g_{m_۲}V_{gs_۶} - g_{m_۱}V_{gs_۵}) \times ۱۰M\Omega \times ۱۰^۳$$

با توجه به مدار داریم:

$$g_{m_۲}V_{gs_۲} = g_{m_۱}V_{gs_۱}$$

$$\Rightarrow ۲/۲(۰-V_{s_۲}) = ۶/۴(V_i-۰) \Rightarrow V_{S_۲} = -\frac{۶/۴V_i}{۲/۲} = \frac{-۳۲}{۱۱}V_i$$

با توجه به مدار داریم:

$$V_{G_۳} = V_{S_۲}$$

$$g_{m_۲}V_{gs_۴} = g_{m_۱}V_{gs_۳} \Rightarrow ۲/۲(۰-V_{S_۴}) = ۶/۴(V_{G_۳}-۰)$$

$$\Rightarrow ۲/۲(۰-V_{S_۴}) = ۶/۴(V_{S_۲}-۰) \Rightarrow V_{S_۴} = \frac{-۶/۴}{۲/۲}V_{S_۲} = (\frac{۳۲}{۱۱})^۲V_i$$

در رابطه V_O داریم:

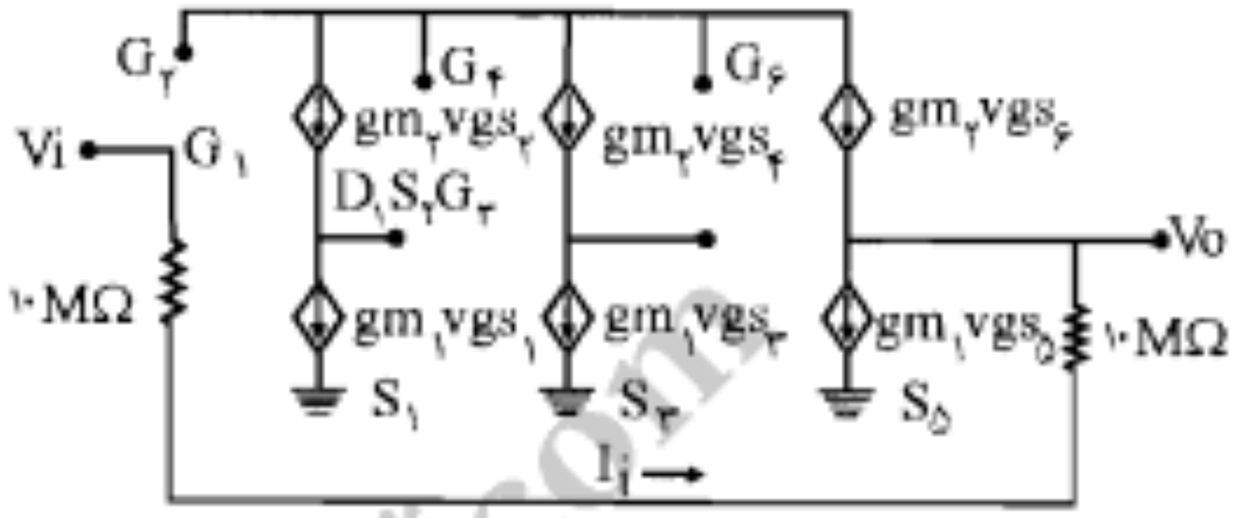
$$V_O = (۲/۲(۰-V_O) - ۶/۴(V_{S_۲}-۰)) \times ۱۰^۴$$

$$\Rightarrow V_O = -۲/۲V_O\times۱۰^۴ - ۶/۴V_{S_۲}\times۱۰^۴ = -۲/۲\times۱۰^۴V_O - ۶/۴\times۱۰^۴\times(\frac{۳۲}{۱۱})^۲V_i$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -۲۴/۶$$

$$R_i = ۱۰M\Omega$$

$$C = ۰ \Rightarrow$$



در این مدار معادل داریم:

$$I_i = g_{m_۱}V_{gs_۵} - g_{m_۲}V_{gs_۶} \qquad (I)$$

$$V_{g_۵} = V_{s_۴} = (\frac{۳۲}{۱۱})^۲V_i \quad , \quad V_{s_۲} = \frac{-۳۲}{۱۱}V_i$$

$$KVL:\ I_i = \frac{V_i - V_{s_۶}}{(۱۰+۱۰)\times۱۰^۳} \Rightarrow V_{s_۶} = -۲\times۱۰^۴I_i + V_i$$

این رابطه را در رابطه I_i (I) قرار می‌دهیم:

$$I_i = g_{m_۱}V_{gs_۵} - g_{m_۲}V_{gs_۶} = ۶/۴(V_{g_۵}-V_{s_۵}) - ۲/۲(V_{g_۶}-V_{s_۶})$$

$$\Rightarrow I_i = ۶/۴((\frac{۳۲}{۱۱})^۲V_i - ۰) - ۲/۲(۰ + ۲\times۱۰^۴I_i - V_i)$$

$$\Rightarrow I_i = ۶/۴\times۸/۴۶V_i - ۴/۴\times۱۰^۴I_i + ۲/۲V_i$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{V_i}{I_i} = ۷۸۰/۹K\Omega$$

www.PnuEB.*.com